



No 05-2006

Coordination internationale des politiques  
climatiques : quelle efficacité ?

Khalil Helioui

AVRIL 2006

---

## **C.I.R.E.D.**

**Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement**

UMR 8568 CNRS / EHESS / ENPC / ENGREF

UMR CIRAD

**45 bis, avenue de la Belle Gabrielle**

**F-94736 Nogent sur Marne CEDEX**

Tel : (33) 1 43 94 73 73 / Fax : (33) 1 43 94 73 70

[www.centre-cired.fr](http://www.centre-cired.fr)



## ***Résumé***

Cet article propose une analyse économique de la coordination internationale contre le réchauffement planétaire intégrant les perspectives de long terme et les contraintes politiques. Il s'interroge ainsi sur les risques économiques et politiques auxquels les permis d'émission négociables pourraient être exposés du fait de pouvoirs de marché ou de distorsions dynamiques. Les seconds s'avèrent les plus difficiles à contrôler. Si la déconcentration des positions nationales est envisageable, aucun organisme international ne peut prétendre fixer, une fois pour toutes, les objectifs à long terme. Dès lors, anticipant que le montant des quotas futurs sera toujours ajusté au vu des tendances réelles, beaucoup de pays ne s'engageront pas dans des programmes structurels suffisamment ambitieux. Cela risque de compromettre l'efficacité de l'action climatique et de fragiliser plus encore le consensus qui lui est nécessaire. La solution alternative, la taxation internationale du carbone, ne présente pas de tels défauts d'incitation, mais elle pose des difficultés politiques. Une combinaison des deux instruments pourrait toutefois, à terme, s'avérer fructueuse.

Mots-clés: Protocole de Kyoto, permis d'émission négociables, taxes carbone, pouvoirs de marché, efficacité dynamique.

## ***Abstract*** : On the efficiency of climate policies international coordination

This article analyses the economic efficiency of climate policies international coordination acknowledging long term perspectives and political constraints. It questions the economic and political viability of emission trading with respect to market power and dynamic distortions. The latter proves more worrying. While one may reasonably expect national positions being decentralized, the Climate Convention cannot commit on long term emission objectives. As a consequence, there is room for strategic behaviour by governments. Structural public programs, crucial to curb long term emissions, are likely to be scaled down because governments expect post-2012 quotas to be revised according to observed trends. This might jeopardize the climate action and further weaken the political consensus it requires. Are carbon taxes a better policy option? It might be the case provided the tax is levied at the international level, but this option faces political obstacles. A hybrid scheme should realise a good compromise between economic efficiency and political acceptability.

Keywords: Kyoto Protocol, emission trading, carbon taxes, market power, dynamic efficiency.

### ***Remerciements :***

L'auteur remercie Dominique Finon, Laurent Gilotte, Philippe Quirion et Laure Toury pour leurs lectures critiques de versions préliminaires de cet article et exprime sa reconnaissance pour le soutien dont il a bénéficié de la part de l'Institut Français de l'Energie.

### ***Acknowledgements :***

The author is indebted to Dominique Finon, Laurent Gilotte, Philippe Quirion and Laure Toury for their helpful comments on preliminary versions of this article. Support by the French Energy Institute, IFE (Institut Français de l'Energie), is also kindly acknowledged.

## Coordination internationale des politiques climatiques : quelle efficacité ?

Khalil Helioui \*  
Avril 2006

La collectivité internationale tente, depuis plus de dix ans, de mettre sur pied une action contre le réchauffement planétaire. Le premier objectif qu'elle s'était donné, plus ou moins symboliquement, lors de la convention de Rio en 1992 – la stabilisation, à l'horizon 2000, des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) dans le monde industrialisé – n'a pas été sérieusement pris en considération. Ainsi, le projet européen de lui associer un engagement sur des mesures concrètes, au centre desquelles figurait l'adoption de taxes carbone, n'a jamais vu le jour. Cinq ans plus tard, en décembre 1997, à Kyoto, la Convention Climat<sup>1</sup> (CC) fixait un second objectif, plus crédible, pour la période 2008-2012 : les quotas, durement négociés, sont juridiquement contraignants. Cet engagement est aussi plus ambitieux : une quarantaine de pays industrialisés acceptent de réduire leurs émissions en moyenne d'environ 5% par rapport à leur niveau de 1990 ; des pays ou régions, comme l'Europe, les Etats-Unis, le Japon, et le Canada, ont des plafonds encore plus sévères. L'accord est accompagné d'une autorisation du commerce de titres d'émissions, disposition adoptée sous la pression des Etats-Unis afin de réduire les coûts par des transactions mutuellement avantageuses.

Suite à sa ratification par la Russie, le protocole de Kyoto est à présent entré en vigueur. Mais l'avenir du processus reste incertain. De nouveaux plafonds pour la période post-2012 devront être négociés ; l'effort devra être renouvelé, étendu aux pays du Sud, et probablement accentué durant de nombreuses décennies pour respecter un objectif raisonnable tel que la limitation de la hausse de la température du globe à 2°C de son niveau préindustriel. Or, comme l'indique le retrait des Etats-Unis, le dispositif adopté suscite de vives réserves. Sera-t-il capable d'assurer un contrôle des émissions efficace et équitable ? N'est-il pas exposé aux comportements opportunistes ? Pire, ne risque-t-il pas de mener à une impasse parce qu'il cristallise la négociation Nord-Sud sur un aspect aussi conflictuel que la répartition de droits d'émission ? En un mot, les permis d'émission négociables offrent-ils une solution de coordination internationale viable ?

Cet article aborde le sujet à travers une analyse économique, confrontée aux contraintes politiques. La première section résume les controverses qu'a suscitées l'adoption du protocole de Kyoto et en dérive des questions principales. Elle évacue les divergences sur l'ambition des premiers objectifs – excessive pour les uns, insuffisante pour les autres –, entretenues par la forte incertitude sur le prix des permis, en observant que celui-ci pourrait être stabilisé à un niveau raisonnable par une gestion dynamique adéquate de l'offre réglementaire de titre. La recherche peut donc se focaliser sur les phénomènes plus intrinsèques susceptibles d'entraver les performances des permis d'émission négociables. La seconde section s'interroge ainsi sur les risques de pouvoirs de marché qui, en dernière analyse, apparaissent maîtrisables. La troisième section évalue la qualité des incitations à long terme à l'aide d'un modèle de jeu de détermination des quotas post-2012 entre la CC et les gouvernements. Les résultats mettent en

---

\* *Chercheur au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED) CNRS-EHESS, 45 bis, avenue de la Belle Gabrielle, Jardin Tropical, 94736-Nogent-sur-Marne/ France. Tel.: 33-1 43 94 73 91; fax : 33-1 43 94 73 70; adresse email : helioui@centre-cired.fr.*

évidence des biais contre-incitatifs suffisamment élevés pour compromettre la viabilité du système des permis négociables. La quatrième section en vient donc à considérer l'option de la taxation, laquelle, à condition que son prélèvement soit international, s'avère exempte de ces biais négatifs, mais pose un problème d'acceptabilité politique. Dès lors, une solution de compromis, combinant permis et taxation et conciliant efficacité théorique et acceptabilité politique, apparaît avantageuse.

## 1. UNE APPROCHE DONT LA VIABILITE EST EN QUESTION

### 1.1. Un système sans précédent

L'ensemble formé par, d'un côté, les quotas nationaux d'émission de GES, et de l'autre, les mécanismes de transfert des titres d'émission constitue un *système de permis d'émission négociables* (SPEN). Les premiers quotas d'émission portent sur toute la période 2008-2012 et sont exprimés en multiples d'une quantité unitaire, égale à une tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>, que l'on appelle *permis d'émission négociable*. A la fin de la période, chaque pays doit détenir un montant de permis lui permettant de couvrir ses émissions. Pour ce faire, les permis peuvent être transférés d'un pays à l'autre à la suite de transactions. Un acheteur augmente son autorisation d'émission à hauteur du volume de permis achetés, celle du vendeur étant diminuée du même montant. Tout pays peut aussi mettre en réserve le volume des permis non consommés en prévision des engagements post-2012.

Les acheteurs de permis seront les pays pour lesquels il sera moins coûteux de respecter leur quota en se tournant vers le marché plutôt qu'en poursuivant leurs programmes nationaux de réduction des émissions<sup>2</sup>. Les simulations des modèles montrent qu'il s'agira surtout des Etats-Unis (s'ils finissent par ratifier Kyoto), de l'Europe, du Japon et du Canada (Grubb et al. [2003]). A l'inverse, les vendeurs seront ceux dont les marges de manœuvre domestiques permettront de dégager un surplus de titres. Les pays en transition, notamment la Russie, seront vraisemblablement dans cette situation : l'ampleur de leur crise de restructuration ayant été sous-évaluée, ils ont reçu à Kyoto un excédent de permis (*hot air*) élevé qui les place en effet en position de vendeurs, voire de vendeurs dominants (Müller [2004]). Bien qu'ils aient été exemptés de quotas, les pays du Sud pourront également vendre des crédits d'émission. Ils devront toutefois le faire par la mise en œuvre de projets « propres » à travers le Mécanisme de Développement Propre (MDP) et au prix de coûts de transaction qui devraient limiter sévèrement le volume des transferts (Michaelowa et Stronzik [2002])<sup>3</sup>.

Ce SPEN est sans précédent : il est appliqué à l'échelle internationale. Jusqu'alors les systèmes de permis mis en place étaient nationaux, comme celui réglementant les émissions de SO<sub>2</sub> aux Etats-Unis ; ils concernent donc des acteurs privés soumis à l'autorité des Etats. Le SPEN prétend, quant à lui, organiser une régulation internationale du comportement de pays souverains. Or, en l'absence d'autorité supra-nationale, tout engagement dans la lutte contre le réchauffement planétaire ne peut se faire qu'avec l'accord des parties concernées. Les sanctions, en cas de non-respect des engagements, sont elles-mêmes soumises au consentement du pays auquel elles devraient s'appliquer (Aldy et al. [2003]).

Dans ces conditions, le SPEN ne pourra fonctionner que s'il est perçu comme un instrument de coordination internationale efficace et équitable (Guesnerie [2003]). Ses avocats (Grubb et al. [2001]) avancent trois arguments en sa faveur. Premièrement, l'instrument est

« politiquement correct » ; il respecte le principe de « subsidiarité » : chaque pays peut choisir librement les moyens de réduire ses émissions, du moment que son quota national est respecté. Deuxièmement, le SPEN facilite<sup>4</sup> des arrangements avec les pays moins riches ou moins sensibles à l'environnement global dont les réticences à accepter des plafonds d'émission peuvent être surmontées par des quotas généreux. Troisièmement, le commerce des permis devrait permettre d'atteindre les objectifs d'émission efficacement en encourageant les actions préventives là où elles sont les moins coûteuses.

L'approche des permis négociables a ainsi finalement prévalu sur le projet de taxe carbone proposé par l'Union européenne à Rio en raison des deux premiers arguments. D'une part, une coordination par des taxes carbone aurait imposé à tous les pays de recourir à cet instrument, ce qui serait apparu comme une entrave à la liberté de choix des politiques domestiques. D'autre part, le maniement international des taxes à des fins d'arrangement politique n'est pas aisé : la crainte des distorsions de concurrence exige leur harmonisation, ce qui limite la faculté d'en moduler le montant selon les dispositions des uns et des autres<sup>5</sup>.

## 1.2. Un système critiqué

Mais les orientations de Kyoto font également l'objet de vives critiques que l'on peut aussi résumer en trois points. D'une part, les Etats-Unis reprochent aux objectifs de Kyoto leur ambition excessive ; ce fut la principale raison avancée pour justifier leur retrait en mars 2001 (Bodansky [2001]). D'autre part, les Européens craignent, au contraire, qu'en raison du *hot air*, le jeu du marché des permis n'aboutisse à un système trop peu contraignant ; or un prix des permis trop faible pourrait décourager les nécessaires changements structurels à long terme et lancer un signal négatif à l'intention des pays du Sud dont on attend des efforts futurs (Woerdman [2002]). Les modèles de simulation numérique des engagements de Kyoto ont fait apparaître une incertitude sur les coûts de réduction des émissions telle qu'ils ne sont parvenus à atténuer ni la critique des Etats-Unis, ni la crainte européenne (Hourcade et Gherzi [2002]). Enfin, la troisième objection affirme, en substance, que le choix du SPEN est intenable à long terme parce que les conflits sur la répartition des droits futurs finiront par bloquer la négociation des objectifs périodiques d'émission (Nordhaus [2001], Cooper [1998]).

### 1.2.1. L'incertitude sur le signal

L'incertitude du signal résultant des plafonds d'émission, qui alimente les deux premières critiques, ne semble pas poser un problème insurmontable. La CC pourrait en effet assurer la stabilité du prix des permis à un niveau raisonnable moyennant l'adoption de procédures simples d'ajustement séquentiel de la contrainte en fonction des tendances observées sur le marché du carbone (Newell et al. [2003])<sup>6</sup>. Un mécanisme de prix-plafond empêcherait ainsi le prix des permis de dépasser une certaine valeur limite en mettant, le cas échéant, à la disposition du marché des titres supplémentaires éventuellement prélevés sur le budget d'émission post-2012<sup>7</sup>. A l'inverse, si la tendance est à des prix faibles, la CC pourrait réviser les quotas post-2012 à la baisse, cela inciterait les vendeurs à mettre une partie de leurs permis de première période en réserve et redresserait le mouvement des prix. Il suffirait, en réalité, que le régulateur international déclare sa volonté de maintenir les prix autour d'une certaine valeur pour que les agents l'anticipent et y contribuent par leurs opérations – de report des acquisitions ou de mise en réserve des titres – avant même l'ajustement des quotas futurs.

### 1.2.2. L'incertitude politique

Les réserves sur la capacité des Etats à trouver un accord durable sur la répartition d'objectifs périodiques d'émission sont en revanche beaucoup moins faciles à évacuer. Principale animatrice des négociations sur les objectifs post-2012, l'Europe, à qui l'on doit déjà l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto, s'est donné pour mission d'élargir la participation internationale aux efforts de contrôle des émissions (CCE, 2005). Sa tâche s'avère difficile. De substantielles concessions aux pays du Sud et aux Etats-Unis, qui restent fermés à toute option pouvant s'apparenter à un frein à leur croissance, semblent inévitables. Les partenaires de l'Union seraient mieux disposés avec des engagements peu contraignants sous la forme d'objectifs de contenu en carbone du PIB, c'est-à-dire de quotas d'émission indexés sur la croissance économique plutôt qu'exprimés en termes absolus comme cela a été le cas à Kyoto<sup>8</sup> (IEA [2002]). Pour chaque pays, le taux d'indexation correspondrait à un ratio de contenu en carbone, *émission de carbone/PIB*, plus ou moins inférieur aux tendances structurelles de l'économie selon l'ambition des objectifs. Les quotas indexés ont le mérite d'ajuster la contrainte environnementale à la variabilité de l'activité économique, mais ont pour contrepartie l'absence de plafonnement des émissions. Ils offrent toutefois une option très intéressante pour l'élargissement de l'action climatique.

Si la recherche d'arrangements couvrant les périodes immédiatement postérieures à 2012 semble déjà délicate, dégager une solution viable à long terme l'est plus encore. Après la phase d'élargissement, il sera nécessaire que l'action climatique passe à un régime de pleine contrainte correspondant à un objectif déterminé. Compte tenu de la nature globale et cumulative du problème climatique, les quotas nationaux sont voués à découler d'une contrainte fixe d'émission globale, de plus en plus sévère. Prenons, par exemple, l'objectif, assez modeste, puisqu'il ne garantit le respect du seuil des 2°C qu'avec une probabilité inférieure à 30% (Meinshausen [2005]), d'une stabilisation des concentrations de GES à 550 ppmv – le double du niveau préindustriel. Pour l'atteindre, les émissions mondiales devraient être réduites de plus de 20% en 2020 et de plus de 60% en 2050 (Van Vuuren et al. [2003])<sup>9</sup>. Comment répartir cet effort collectif ?

Les pays du Nord voudront que les futurs budgets d'émission soient distribués selon le principe pragmatique du *grandfathering*, déjà appliqué à Kyoto, attribuant les quotas proportionnellement aux émissions nationales passées. Cette option présente l'inconvénient de légitimer et de figer l'actuelle distribution inégalitaire de l'usage de l'atmosphère. Les pays du Sud ne manqueront pas de s'y opposer en invoquant leur droit à poursuivre leur développement ; ils réclameront, au nom de l'équité<sup>10</sup>, un nombre identique de permis par tête d'habitant. Les pays du Nord, notamment les Etats-Unis, rejeteront cette approche qui, en raison de leurs émissions par tête plus élevées, les obligerait à acheter de grandes quantités de permis au Sud (Cooper [1998]). Le compromis imaginé par Meyer [2000] d'une convergence progressive, étalée sur quelques décennies, d'un mode *grandfathering* vers une allocation égalitaire par tête est certes judicieux, mais sans pour autant apporter la garantie d'un accord ; il ne fait que différer dans le temps la transmission de la rente atmosphérique du Nord vers le Sud.

L'enjeu des discussions sera les centaines de milliards de dollars que devrait valoir le marché des permis. L'objectif de stabilisation à 550 ppmv implique ainsi, en 2020, un budget d'émission mondial d'environ 45 GtCO<sub>2</sub>, pour une valeur du carbone de 30 \$/tCO<sub>2</sub> (Van Vuuren et al. [2003]). Selon que la règle retenue d'attribution des quotas se rapprochera du

*grandfathering* ou de l'allocation par tête, des sommes considérables resteront donc dans les pays industrialisés ou iront plus au Sud. L'énormité des montants financiers, le déséquilibre entre les uns, capables de répondre au réchauffement planétaire, mais tentés de s'en considérer préservés, et les autres, plus exposés au risque, mais privés de ressources pour y faire face, l'extrême politisation des débats, tout cela fait craindre d'irréductibles oppositions. Au point que des auteurs influents (Nordhaus [2001], Cooper [1998]) affirment qu'il aurait été préférable d'opter pour des taxes carbone et d'éviter ainsi le problème des transferts internationaux de richesse politiquement insoutenables.

### **1.3. Une remise en cause des hypothèses d'efficience**

Nous posons la question de la viabilité du SPEN sous l'angle de l'analyse économique, sans perdre de vue les contraintes politiques : s'agit-il réellement d'un instrument permettant d'atteindre les objectifs souhaités au moindre coût ? Quelles corrections faudrait-il apporter à l'architecture actuelle pour assurer une coordination internationale efficace et politiquement acceptable ?

L'analyse économique se déroule à partir d'une remise en cause des hypothèses des théorèmes classiques de Montgomery (1972) et de Tietenberg (1985). Ces auteurs démontrent que les systèmes de permis réalisent une distribution optimale des efforts de réduction des émissions, aussi bien dans l'espace (efficacité statique) que dans le temps (efficacité dynamique). Il reste toutefois que leurs théorèmes reposent sur deux hypothèses fondamentales restrictives : les agents (1) ne doivent pas pouvoir influencer le prix des permis, ni (2) exercer une influence sur les quotas futurs. Or, chacune de ces hypothèses est discutable, et à chacune peut être associée une source potentielle d'inefficacité qui la remet en question : les pouvoirs de marché, pour la première, et, pour la seconde, l'incapacité, préjudiciable à la qualité des incitations à long terme, dans laquelle se trouve la CC pour garantir suffisamment à l'avance le niveau des quotas futurs.

## **2. EVALUATION DES POUVOIRS DE MARCHÉ**

Il y a possibilité de manipulation du prix des permis lorsqu'un agent possède la capacité de modifier celui-ci, à son avantage et de manière significative, en jouant sur le niveau de son offre ou sur celui de sa demande. Il dispose alors d'un pouvoir de marché.

### **2.1. Application du modèle de Hahn**

Nous évaluons les possibilités de pouvoirs de marché au sein du SPEN à l'aide du modèle de Hahn (1984). Ce modèle permet de tester l'hypothèse qu'un pays tente de manipuler le prix des permis tandis que les autres, qualifiés globalement de *frange*, se comportent de façon concurrentielle (i.e. ils considèrent le prix des permis comme un paramètre fixe). Il s'agit d'un modèle simple dans lequel on retrouve un comportement classique analogue à celui du monopole (un vendeur dominant) ou du monopsonne (un acheteur dominant), selon la position de marché du pays non concurrentiel. L'offre (la demande) d'un agent concurrentiel correspond au solde de son budget d'émission après qu'il ait adopté l'ensemble des mesures préventives jusqu'à ce que ce que leur coût (marginal) atteigne le prix des permis. L'agent

manipulateur restreint quant à lui son offre (sa demande) potentielle afin d'influencer en sa faveur le prix des permis. Il optimise sa manipulation lorsque les gains sur la valeur des ventes (achats) de permis sont, à la marge, exactement compensés par le coût de la restriction du volume des transactions avec la frange (cf. Annexe 1). En position de vendeur, l'agent non concurrentiel aura ainsi intérêt, jusqu'à un certain point, à diminuer son offre de permis pour en augmenter le prix ; son coût marginal de contrôle des émissions sera alors inférieur au prix des permis. S'il est acheteur, c'est sa demande qu'il limitera, et son coût marginal sera supérieur au prix des permis.

Afin de détecter les pays susceptibles d'influencer le marché des permis, le modèle de Hahn est appliqué en attribuant le comportement non-concurrentiel successivement aux principaux participants au SPEN. Les calculs nécessitent des estimations sur les émissions tendancielles et les coûts de réduction qui leur sont associés afin de déterminer les fonctions d'offre ou de demande de permis. Nous utilisons les données de la littérature<sup>11</sup> pour tester deux scénarios à l'horizon 2010, l'un envisageant la participation des Etats-Unis, l'autre non.

Dans le cas d'une participation des Etats-Unis, les simulations montrent qu'ils seraient, avec les pays en transition, le seul acteur susceptible d'influencer le marché significativement (Tableau 1). En effet, les premiers se retrouveraient en position d'importateurs prépondérants (66% de la demande) tandis que les seconds domineraient l'offre de permis (90% du marché). Les Etats-Unis pourraient restreindre artificiellement leur demande et faire chuter ainsi le prix des permis de plus de 50%. Avec ce comportement de monopsonne, ils réduiraient le coût du respect de leurs engagements de 25%, au prix toutefois d'un surcoût du contrôle des émissions de plus de 44%. Par la contraction de leur offre, les pays en transition pourraient, de leur côté, s'ils se coalisent, induire une augmentation du prix des permis de près de 150%, accroître leurs gains de plus de 60%, mais provoquer ainsi un doublement des coûts globaux.

Sans les Etats-Unis, la demande de permis chute de manière drastique ; le prix des titres s'approchant de zéro, d'éventuelles manipulations à la baisse de la part des pays importateurs n'auraient pas d'objet. En revanche, les pays en transition, qui ne gagnent rien à brader leurs titres, seraient d'autant plus incités à faire monter les prix qu'ils se retrouveraient quasiment en situation d'unique vendeurs (99% de l'offre de permis). Les résultats des simulations montrent, qu'en restreignant leur offre, ils pourraient faire passer le prix des permis de 0,2 à 23\$/tC, engrangeant ainsi un surplus de plus de deux milliards de dollars et occasionnant un surcoût global de plus d'un milliard de dollars.

**Tableau 1. Estimation des pouvoirs de marché**

Régions <sup>a</sup>	Part de marché <sup>b</sup>	Manipulation des prix <sup>c</sup>	Gain individuel <sup>d</sup>	Perte d'efficacité <sup>e</sup>
<i>Avec Etats-Unis</i>				
UE	8%	-2%	1%	0%
EU	66%	-52%	25%	44%
JAP	14%	-2%	1%	1%
CANZ	13%	-1%	1%	0%
PT	90%	149%	63%	207%
<i>Sans Etats-Unis</i>				
UE	31%	0%	0%	0%
JAP	35%	0%	0%	0%
CANZ	34%	0%	0%	0%
PT	99%	de 0,2 à 23\$/tC	de 42 M\$ à 2,4 G\$	de 8 M\$ à 1,3 G\$

a : CANZ : Canada, Australie, Nouvelle-Zélande ; PT : Pays en Transition ; JAP : Japon ; EU : Etats-Unis ; UE : Union Européenne.

b: part de la région considérée dans la demande ou dans l'offre totale dans l'hypothèse de concurrence parfaite.

c: variation relative du prix des permis lorsqu'on passe de l'hypothèse de concurrence parfaite au modèle de Hahn attribuant un pouvoir de marché à la région concernée. (La variation est absolue dans le cas d'un pouvoir de marché de l'AUS, sans la participation des EU.)

d: diminution relative du coût (ou augmentation relative du gain) régional résultant du pouvoir de marché. (La variation est absolue dans le cas d'un pouvoir de marché de l'AUS, sans la participation des EU.)

e: augmentation relative du coût total du contrôle des émissions lorsqu'on passe de l'hypothèse de concurrence parfaite au modèle de Hahn attribuant un pouvoir de marché à la région concernée. (La variation est absolue dans le cas d'un pouvoir de marché de l'AUS, sans la participation des EU.)

Nos estimations du pouvoir de marché des pays en transition, avec et sans les Etats-Unis, sont conformes aux évaluations disponibles dans la littérature. Le champ des études antérieures est cependant plus restreint que le nôtre dans la mesure où, à notre connaissance, celles-ci limitent l'hypothèse de comportement stratégique aux pays en transition (Bernstein et al. [1999], Boehringer et Loeshl [2001], Manne et Richels [2001]).

## 2.2. Portée des résultats

Les résultats précédents ne sont évidemment que des ordres de grandeur théoriques. Le modèle de Hahn aboutit à des estimations certainement exagérées (1) parce qu'il n'attribue de comportement stratégique qu'à une seule région ou un seul pays à la fois, et (2) parce qu'il suppose que les permis restent totalement sous contrôle gouvernemental. Or, d'une part, face à une stratégie monopolistique des pays en transition, par exemple, il serait étonnant que les pays industrialisés importateurs restent sans réponse ; on assisterait plus sûrement à des marchandages complexes entre les deux blocs qui devraient modérer l'exercice des pouvoirs de marché.

D'autre part, une partie significative des titres nationaux sera vraisemblablement rétrocédée à des entreprises. Le secteur privé devrait y être fortement favorable et exercer des pressions dans ce sens. Les entreprises grosses émettrices échapperaient ainsi aux instruments domestiques alternatifs plus contraignants que sont les normes et les taxes, certaines d'entre elles pouvant même tirer profit du commerce des permis d'émission. Nécessaire au ralliement du secteur privé, la rétrocession des permis déconcentrerait et affaiblirait les positions gouvernementales sur le marché du carbone. Une extension du modèle de Hahn montre en effet que les pouvoirs de marché sont inversement proportionnels au nombre d'entreprises (supposées identiques) participantes<sup>12</sup>. Il n'est certes pas certain que tous les gouvernements procéderont à une large rétrocession de leurs permis. L'Europe a cependant déjà commencé à le faire avec son système expérimental couvrant la période 2005-2007 et faisant participer environ 12000 entités émettrices. La plupart des pays industrialisés y étant favorables, la CC pourrait compter sur leur concours pour ériger cette pratique en règle.

Ainsi, l'absence de manipulation du prix des permis est une condition d'efficacité dont le respect n'est pas complètement assuré, mais qui pourrait l'être moyennant l'adoption d'une obligation de rétrocession des permis nationaux. Nous allons voir que l'hypothèse portant sur les quotas futurs, censés être fixés indépendamment des politiques suivies par les participants, est plus problématique.

### 3. LA QUALITE DES INCITATIONS A LONG TERME

Deux raisons amènent à remettre en cause l'hypothèse de quotas futurs « non-influçables ». La première est due au caractère irréversible de l'incidence des choix structurels sur les possibilités de contrôle des émissions à long terme. Les objectifs post-2012 atteignables à un coût raisonnable vont dépendre des politiques structurelles, notamment publiques, qui auront été menées aux périodes précédentes, en matière de transport, d'habitat et de R&D. Plus les programmes structurels auront été ambitieux, plus les objectifs d'émission pourront l'être. A l'inverse, moins ceux-là l'auront été, et moins ceux-ci pourront l'être. Les gouvernements ne seront correctement incités à mettre en œuvre leurs programmes que s'ils estiment (1) que la CC est capable de fixer des objectifs à long terme sérieux et, surtout, (2) qu'elle les maintiendra. Or, et cette seconde raison est déterminante pour mettre en doute le caractère exogène des quotas futurs, la CC ne peut s'engager à les maintenir en toutes circonstances.

Il n'est en effet pas réaliste d'imaginer que la CC maintienne des quotas trop sévères, même s'ils le sont devenus par la faute de politiques insuffisantes, dans le but de punir « les mauvais élèves de l'action climatique » et d'asseoir ainsi sa crédibilité. De même, il est peu vraisemblable que la CC puisse, par la menace de sanctions crédibles, obliger les gouvernements à adopter des programmes conformes aux objectifs à long terme<sup>13</sup>. Le manque d'autorité de la CC peut rendre ainsi inéluctable la révision des cibles futures. En pratique, les choix structurels gouvernementaux détermineront les quotas post-2012, plutôt que l'inverse ; c'est que l'on appelle « l'effet cliquet » (Freixas et *al.* [1985], Rey et Salanier [1990]). Quels biais peuvent résulter de ce phénomène ?

#### 3.1. Un modèle de jeu entre les gouvernements et la Convention Climat

Pour répondre à cette question, nous considérons un modèle de jeu « à la Stackelberg » (Gibbons, 1992) – leader-suiveur – où la CC, incapable d'imposer un optimum de premier rang prédéterminé, ajuste ses objectifs de long terme aux tendances anticipées. Le modèle représente un système international de permis à deux périodes, 1 et 2 (on peut imaginer que l'une est centrée sur 2010, et l'autre sur 2030). Les quotas de la première période sont supposés déjà fixés en dehors du jeu, ceux de la seconde vont en résulter. Les dommages climatiques dépendent des émissions totales cumulées sur les deux périodes et se concrétisent en seconde période. Les fonctions de dommages et de coût de contrôle des émissions sont supposées, pour simplifier, connues avec certitude.

Dans chaque pays, la totalité des permis nationaux est rétrocédée à des entreprises. Le marché des permis est parfaitement concurrentiel ; les titres sont transférables sans contraintes d'un agent à l'autre et d'une date à l'autre. Les entreprises peuvent réduire leurs émissions par des actions de « court terme » (optimisation des processus industriels, substitution énergétique, etc.) dont l'effet est limité à la période où elles sont réalisées. Les gouvernements, qui ne participent pas directement au marché des permis, ont quant à eux pour rôle d'appliquer des politiques publiques de « long terme » (transports, habitat, R&D, etc.), qui peuvent être décidées en période 1, mais dont l'effet n'est obtenu qu'en période 2. Moins ces politiques seront ambitieuses, plus les actions (de court terme) qu'il faudra mettre en œuvre pour atteindre un objectif environnemental donné seront coûteuses.

Avant le début de la première période, la CC fixe le quota mondial de seconde période à un niveau optimal compte tenu, d'un côté, des dommages climatiques mondiaux à éviter, de

l'autre, de l'ensemble des coûts de contrôle des émissions. Elle ne peut cependant viser qu'un optimum de second rang conditionné aux choix structurels gouvernementaux de première période<sup>14</sup>. La CC distribue le quota global ainsi déterminé selon une règle exogène de répartition. Les plafonds de certains pays peuvent ne pas être indexés sur le budget mondial, mais sur leurs émissions de référence de seconde période, c'est-à-dire les émissions qui seraient observées sans l'application d'actions de court terme. La méthode d'allocation est alors équivalente à l'indexation des quotas sur le PIB.

Dans ce jeu, chaque gouvernement sait que ses efforts structurels influencent à la baisse son quota de seconde période. Si celui-ci est indexé sur le PIB, le resserrement se fera directement à la suite d'une révision à la baisse du contenu en carbone de référence. Si le quota national est dérivé du budget d'émission mondial, le resserrement résultera indirectement de la révision à la baisse de ce dernier. Dans les deux cas, l'anticipation de l'incidence sur le quota de seconde période est donc *contre-incitative* – elle n'encourage pas assez, au regard de l'optimum global, les politiques structurelles. Mais il y a aussi un effet *sur-incitatif* – poussant à aller au-delà de l'optimum collectif : chaque gouvernement se rend compte que des objectifs de seconde période plus ambitieux sont synonymes de moindres dommages climatiques nationaux.

La résolution du modèle (cf. Annexe 3) montre que le terme contre-incitatif correspond au nombre de permis que le pays s'attend à recevoir en moins chaque fois qu'il réduit d'une unité ses émissions de long terme<sup>15</sup>. Dans le cas d'un quota indexé sur le budget global, il s'agit du poids du pays dans le quota mondial. Le terme sur-incitatif correspond quant à lui à l'exposition au risque climatique du pays considéré ; c'est, très précisément, le pourcentage des dommages climatiques mondiaux dont il sera affecté. Ces deux termes affectent la qualité de l'incitation aux actions de long terme d'une manière se rapportant simplement au prix des permis. Par exemple, pour une sensibilité de 10 % au quota de seconde période, mesurée par le ratio entre (1) la réduction du nombre de permis et (2) celle des émissions tendancielle qui la provoque, l'effet contre-incitatif sera équivalent à une dépréciation de 10 % du prix des permis ; pour une exposition de 10% aux dommages climatiques mondiaux, l'effet sur-incitatif correspondra à une appréciation de 10 %. La direction des biais structurels est donc théoriquement ambiguë ; elle dépend de la comparaison, pour le pays ou la région concernés, entre, d'un côté, la sensibilité au quota de seconde période, de l'autre côté, l'exposition au risque climatique.

Le modèle précédent aboutit à une caractérisation des distorsions dynamiques précise et se prêtant à des estimations numériques. Il prolonge les résultats de Biglaiser et *al.* [1995] démontrant que l'incapacité du régulateur à s'engager sur des quotas à long terme fermes se traduit nécessairement par des distorsions<sup>16</sup>.

### **3.2. Des distorsions significatives**

Les estimations numériques suggèrent que les effets contre-incitatifs l'emportent nettement. Nous utilisons la distribution internationale des dommages climatiques de Nordhaus [1998] pour un réchauffement de 2,5°C et envisageons différentes règles d'allocation des quotas futurs. Comme le montre le Tableau 2, les effets contre-incitatifs dominent pour les règles les plus communément admises prévoyant l'allocation des permis futurs selon le mode de *grandfathering* (GF) ou selon un règle de convergence (CONV) vers l'égalité par tête

d'habitant (Meyer [2000]). Cela est dû au fait que les pays gros émetteurs et/ou fortement peuplés sont relativement moins exposés au réchauffement planétaire.

Considérons, par exemple, les Etats-Unis, dans le cas d'une règle de *grandfathering*, répartissant les quotas au prorata des émissions de 1990 : leur poids dans le quota mondial est de 24% alors qu'ils s'attendent à ne recevoir que 6% des dommages climatiques mondiaux. L'effet contre-incitatif net est donc de  $24\% - 6\% = 18\%$ . L'inconvénient peut paraître acceptable, mais en adoptant des quotas futurs indexés sur le PIB, hypothèse très plausible notamment pour les prochaines périodes d'engagement, l'incitation au changement structurel pourrait alors être très fortement atténuée. Si les Etats-Unis et la Chine obtiennent que leurs quotas soient indexés à la croissance (INDEX), par exemple avec un objectif de réduction de 30% de l'intensité en carbone du PIB – correspondant à un taux d'indexation aux émissions tendancielle de 70% –, le biais négatif est (en valeur absolue) de 76% ( $82\% - 6\%$ ) pour les premiers et de près de 100% ( $108\% - 9\%$ ) pour la seconde<sup>17</sup>. La seule région industrialisée où l'effet sur-incitatif l'emporte sur le biais contre-incitatif, pour les règles d'allocation étudiées, est l'Europe. Ce continent concentre en effet une grande partie des dommages climatiques mondiaux (43%) pour respectivement seulement 15% et 7% des émissions et de la population globales.

**Tableau 2. Les incidences stratégiques de trois règles d'allocation**

Région <sup>b</sup>	CANZ	PT	JAP	EU	UE	CHI	IND	RM
<b>Dommages climatiques (%)</b>	0,1	-0,2	2,5	5,7	43,1	9,1	18,4	21,2
<b>Sensibilité au quota de seconde période selon la règle d'allocation<sup>a</sup> (%)</b>								
GF	3,1	25,5	4,7	23,5	14,5	11,3	3,4	14,0
CONV	2,3	19,2	3,9	16,6	11,7	14,8	8,0	23,5
INDEX	3,4	28,0	5,6	82,1	17,1	107,9	11,7	34,3
<b>Taux de distorsion nette (%)</b>								
GF	-3,0	-25,7	-2,2	-17,7	28,6	-2,1	15,0	7,2
CONV	-2,2	-19,4	-1,4	-10,9	31,4	-5,7	10,4	-2,3
INDEX	-3,3	-28,2	-3,1	-76,4	26,0	-98,8	6,7	-13,1

<sup>a</sup>: GF : allocation proportionnelle aux émissions (1990) ; CONV : allocation mixte que l'on obtient en 2030 en admettant une convergence linéaire d'une allocation proportionnelle aux émissions (en 1990) à une allocation uniforme par tête d'habitant (en 2100) ; INDEX : allocation où les Etats-Unis et la Chine reçoivent des quotas indexés au PIB (-30% de contenu en carbone) et où les autres pays se partagent le budget résiduel conformément à leur poids dans l'allocation CONV.

<sup>b</sup> : CANZ : Canada, Australie, Nouvelle-Zélande ; PT : Pays en Transition ; JAP : Japon ; EU : Etats-Unis ; UE : Union Européenne ; CHI : Chine ; IND : Inde ; RM : Reste du Monde.

Ces résultats suggèrent qu'il existe un risque systématique que les participants au SPEN mènent des politiques structurelles laxistes et provoquent périodiquement un relâchement des objectifs à long terme. On constate aussi que les règles d'allocation les plus favorables (en termes de répartition des quotas) à un pays ou à une région donnés augmentent leur sensibilité au quota de seconde période et les exposent d'autant plus aux distorsions dynamiques. Le problème est manifeste avec des quotas indexés : ils introduisent une corrélation, de valeur négative et croissante selon le taux d'indexation, entre les efforts structurels et le volume des permis attendus. Cela ne manquera pas de compliquer les négociations futures. Les pays qui n'arrivent déjà pas à se mettre d'accord sur la notion de partage équitable de la contrainte auront ainsi, de surcroît, matière à s'accuser mutuellement de favoriser des règles menaçant l'intégrité même de l'action climatique.

#### **4. LA TAXATION DU CARBONE, UNE ALTERNATIVE AUX PERMIS NEGOCIABLES ?**

Nous voici maintenant avec deux bonnes raisons de nous demander, avec Cooper [1998] et Nordhaus [2001], s'il n'aurait pas été préférable de choisir un autre instrument de marché, la taxation des émissions de carbone, plutôt que les permis négociables. Au problème de la répartition des droits d'émission évoqué en première section s'ajoute en effet celui des distorsions dynamiques dont nous venons de souligner les graves implications. La taxation permettrait-elle d'éviter ces difficultés ?

Dans les études classiques, l'équivalence théorique entre les permis et les taxes n'est souvent remise en question qu'en situation d'incertitude sur les coûts et les dommages (Cropper et Oates [1992]). Nous verrons cependant que les deux instruments se distinguent aussi sur le plan de l'efficacité dynamique et qu'il convient également de tenir compte de leurs différences en matière d'acceptabilité politique. Mais il nous faut tout d'abord lever une ambiguïté et préciser le type de taxe carbone à considérer : s'agit-il de taxes nationales (internationalement harmonisées pour éviter les distorsions de concurrence) ou d'une taxe unique prélevée à l'échelle internationale ?

##### **4.1. Inadéquation des taxes carbone nationales harmonisées**

Les taxes carbone nationales constituent l'alternative la plus fréquemment opposée aux permis négociables (Cooper [1998] ; Hahn [1998] ; Nordhaus [2001]). Elles bénéficient en effet, pour des raisons d'acceptabilité politique, d'un préjugé favorable par rapport à un instrument international : dans un cas, les gouvernements conservent la maîtrise des recettes fiscales, dans l'autre, celles-ci leur échappent au profit d'une institution multilatérale.

Pourtant, un examen des deux options suggère que les défauts de la première sont tels que seule la seconde offre une véritable alternative au SPEN. En premier lieu, l'harmonisation, d'un pays à l'autre, du montant de taxes carbone nationales donnerait matière à de vives controverses techniques. L'application de modèles, pourtant très simplifiés, montre en effet que le calcul des taxes harmonisées fait intervenir, entre autres, des paramètres aussi difficiles à estimer que les élasticité-prix – mesurant leur effet sur les consommations d'énergie fossile – ou encore le coût d'opportunité des fonds publics – mesurant la perte d'efficacité globale générée par la fiscalité dans un pays donné (Hoel [1993]). Les taxes carbone étant réputées régressives (Smith [1998])<sup>18</sup>, il faudrait aussi tenir compte des difficultés pour négocier des exemptions à certaines catégories sociales.

Mais le principal problème des taxes carbone nationales est qu'elles n'exercent pas d'incitation sur les pouvoirs publics. Avec cet instrument, le signal adressé en direction des politiques structurelles n'est en rien amélioré, bien au contraire, il disparaît complètement. En effet, les taxes nationales exercent un pouvoir d'incitation sur les agents privés, mais elles n'ont pas d'incidence sur les choix de la puissance publique, garante des intérêts nationaux, qui les applique : à ses yeux, elles représentent, en même temps, un coût (pour les administrés) et une recette (pour le budget), dont les effets d'incitation se compensent (cf. Annexe 3).

#### **4.2. Une taxe carbone internationale : une solution avantageuse mais encore trop audacieuse**

La taxation internationale du carbone est une alternative théoriquement plus intéressante. Premièrement, contrairement aux taxes nationales, cet instrument exerce un effet d'incitation aussi bien sur les acteurs privés que publics : le prélèvement qu'il opère correspond à un véritable coût financier pour le pays<sup>19</sup>. Deuxièmement, la taxe internationale exerce une incitation efficace à long terme, propriété compromise avec les permis (section 3). La taxation n'offrirait en effet pas de prise aux comportements stratégiques car son montant ne peut être influencé par le niveau, plus ou moins ambitieux, des politiques structurelles. En effet, sa valeur efficace – le dommage climatique marginal – est, en raison du caractère lentement cumulatif du risque, une constante, quasiment indépendante du niveau des émissions sur une période raisonnablement longue (Newell et Pizer [2003])<sup>20</sup>.

Une taxe carbone internationale pose toutefois une difficulté politique. Elle impliquerait, même pour un montant modeste – par exemple de 2\$/tCO<sub>2</sub>, pour environ 40 GtCO<sub>2</sub> en 2010 – des transferts de l'ordre de la centaine de milliards de dollars allant des économies nationales en direction d'un fond multilatéral. Il est peu probable que de tels transferts puissent être acceptés dans un avenir proche (OCDE [1992]).

#### **4.3. Une option hybride pour l'après-Kyoto ?**

Irréaliste à court terme, l'introduction d'une taxe carbone internationale est cependant envisageable à plus long terme, en combinaison avec le SPEN. Une telle combinaison pourrait débiter après l'élargissement du système des quotas aux principaux pays du Sud, c'est-à-dire dans, peut-être, environ 10 ou 20 ans. Elle consoliderait l'efficacité et la pérennité de l'action climatique internationale. Car les deux instruments sont doublement complémentaires.

Comme nous l'avons vu (§ 1.1), les permis d'émission négociables sont propices à l'amorce et à l'élargissement d'un processus d'engagement climatique, mais leur efficacité économique et politique risque fort de se détériorer en même temps que la contrainte se globalise et devient stricte. Du point de vue de la qualité des incitations, l'introduction, à terme, d'une taxe réduirait les distorsions dynamiques affectant le SPEN. Il convient d'ailleurs de remarquer qu'il suffirait que la taxe soit progressivement introduite au moment où la contrainte d'émission globale devient plus stricte. Le choix des politiques structurelles obéit en effet à de fortes considérations politiques et sociales qui devraient, dans tous les cas, prendre le dessus sur les objectifs climatiques tant que ceux-ci n'auront pas d'incidence macroéconomique significative. Le délai d'une ou deux décennies pour introduire la taxe ne devrait donc pas être véritablement préjudiciable.

Sur le plan de l'efficacité politique, la taxe internationale offrirait un moyen adéquat pour atténuer les tensions futures auquel sera exposé le SPEN. Elle réduirait mécaniquement la valeur des permis et reviendrait à placer, à concurrence de son montant, une partie de la valeur des droits d'émission sous contrôle multilatéral. Le prix implicite de la contrainte carbone se décompose en effet additivement entre le prix des permis et le montant de la taxe. Pour un budget d'émission de 45 GtCO<sub>2</sub> en 2020, par exemple, le prix des permis, qui autrement serait de 30\$/ tCO<sub>2</sub> (Van Vuuren et al. [2003]), serait ainsi réduit à 20\$/ tCO<sub>2</sub> par une taxe internationale de 10\$/ tCO<sub>2</sub>. La taxation permet donc de contrôler le prix des permis

et, de ce fait, de moduler le montant des transferts financiers associés à leur commerce. Elle offre ainsi la possibilité de réduire les enjeux de la négociation, éminemment conflictuelle, sur la répartition des quotas entre le Nord et le Sud, l’Ouest et l’Est. Le problème du partage des droits d’émission est (en partie) remplacé par celui de la bonne gestion collective des recettes de la taxe, certes toujours délicat, mais se présentant de manière plus sereine du point de vue géopolitique.

Outre ses propriétés d’efficacité économique et politique, une taxe carbone internationale offrirait un moyen pertinent pour financer des actions complémentaires de R&D, ou d’aide aux régions touchées par le réchauffement climatique. La taxe pourrait à terme dégager suffisamment de ressources pour soutenir d’autres programmes internationaux prioritaires notamment en matière de développement. Toutes ces actions pourraient ainsi bénéficier d’un financement autonome, régulier, protégé des dispositions changeantes des Etats.

Il convient de bien noter que la combinaison ici envisagée se distingue des solutions hybrides classiquement discutées dans la littérature, telle que l’introduction d’un prix-plafond, autant par sa forme que par les objectifs poursuivis. La taxe s’applique ici à toutes les émissions, quand le prix-plafond ne frappe que les rejets excédentaires. Celle-ci prétend, à la fois, corriger une distorsion dynamique et réorienter des transferts financiers, celui-là vise à stabiliser l’intensité de la contrainte carbone.

**Tableau 3. La complémentarité permis négociables / taxe carbone internationale**

Phase de coordination	Amorce et Elargissement		Régime de pleine contrainte	
	Efficacité dynamique	Efficacité Politique	Efficacité dynamique	Efficacité Politique
<b>Instrument</b>				
<b>Permis d’émission négociable</b>	<b>Acceptable</b>  Distorsions dynamiques encore peu actives	<b>Bonne</b>  Redistribution internationale très souple	<b>Mauvaise</b>  Distorsions dynamiques potentiellement significatives	<b>Mauvaise</b>  Aggravation des conflits sur la répartition des droits d’émission
<b>Taxe carbone internationale</b>	<b>Bonne</b>	<b>Mauvaise</b>  Acceptation de ponctions financières en direction d’un fonds international	<b>Bonne</b>	<b>Bonne</b> (relativement)  Contrôle financier multilatéral du budget d’émission

Notre analyse de la coordination climatique internationale par les permis d’émission négociables a été développée à partir de l’examen de deux types de possibilités de comportements stratégiques, l’un visant le prix des permis, l’autre le niveau des quotas futurs. Ces risques résultent de la nature *non atomique* des acteurs du système des permis : les

participants ne seront pas simplement des entreprises mais aussi des gouvernements nationaux. Potentiellement significatifs, les pouvoirs de marché seraient éliminés si les gouvernements procédaient, de leur propre initiative ou par obligation internationale, à une large rétrocession des permis aux entreprises. L'effet cliquet, compromettant les objectifs à long terme par l'insuffisance des politiques structurelles, est, en revanche, pratiquement impossible à neutraliser. Une régulation volontaire d'Etats souverains ne peut, en effet, ni garantir le maintien des objectifs, ni imposer les politiques domestiques à suivre. Le problème des distorsions dynamiques s'ajoute donc à celui des conflits à venir sur la répartition des droits d'émission futurs pour hypothéquer le SPEN.

Il convient d'observer que notre remise en cause du choix des permis d'émission négociables dans le contrôle international des GES repose entièrement sur une analyse critique des conditions politiques d'application de cet instrument. Si la coordination internationale est à terme menacée, ce n'est pas par la faute d'un défaut intrinsèque, mais parce que les conditions politiques d'une utilisation durablement efficace et acceptable des permis négociables ne seront probablement pas réunies.

Avec un montant optimal indépendant des politiques gouvernementales, une taxe internationale sur le carbone serait économiquement plus efficace. De ce point de vue, il s'agit d'un instrument robuste à une situation de régulation faible autorisant la renégociation des objectifs en fonction des résultats. Encore faut-il que son principe même soit acceptable. Il ne le sera vraisemblablement pas, du moins à court terme. Mais les conditions politiques ne sont pas immuables. Favorable à l'amorce et à l'élargissement d'une action internationale, la « flexibilité politique » des permis devient un handicap en régime de pleine contrainte. La « courbe d'acceptabilité » de la taxation est quant à elle inverse et complémentaire de celle des permis. Cet instrument devrait être en effet reconsidéré à mesure que se manifesteront les défauts du système des permis et la nécessité de renforcer le financement de la gouvernance mondiale. La synthèse des arguments économiques et politiques, parfois contraires, conduit ainsi finalement à préconiser une approche hybride, amorcée par un SPEN, et, à terme, complétée et pérennisée par l'introduction d'une taxe carbone internationale.

L'introduction, à terme, d'une taxe carbone internationale en complément des quotas d'émission mérite d'être considérée par l'Europe dans le cadre de sa préparation de l'après-Kyoto. L'Union est aujourd'hui le principal moteur de l'action internationale contre le réchauffement planétaire. Sa patiente négociation avec la Russie a déjà permis l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto. Son prochain défi est de réussir l'élargissement progressif de l'action sans que cela se paye par son affaiblissement. Une autre ambition des Européens est de renforcer les moyens de gouvernance mondiale en faveur de l'environnement et du développement. Une évolution vers un système hybride – SPEN et taxe carbone internationale – aiderait à la réalisation de ces deux objectifs.

## ANNEXE 1

### Le modèle de Hahn

Soient  $N$  agents émetteurs auxquels sont alloués des permis d'émission négociables en quantités  $q_1, \dots, q_N$ , avec  $\sum_{i=1}^N q_i = Q$ , où  $Q$  est le plafond d'émission global. Le coût individuel de la contrainte environnementale s'écrit

$$c_i(e_i^0 - e_i) + p(e_i - q_i)$$

où  $c_i(e_i^0 - e_i)$  représente le coût que supporte l'agent  $i$  pour ramener ses émissions de leur niveau non contraint  $e_i^0$  à la valeur  $e_i$  ;  $p$  désigne le prix des permis ; et  $e_i - q_i$  correspond aux acquisitions nettes de titres couvrant l'écart entre les émissions constatées et le quota initial.

Le modèle de Hahn détermine l'équilibre résultant du comportement non concurrentiel de l'agent 1 en deux étapes. Dans une première étape, on résout l'équilibre de marché contingent à un volume donné de transactions effectuées par l'agent 1 auquel correspond un certain niveau d'émission  $e_1$  ; il en résulte une relation  $p = p(e_1)$ .

Dans une seconde étape, il s'agit de se mettre dans la situation de l'agent 1 : celui-ci cherche à minimiser ses coûts, non pas comme un acteur concurrentiel qui néglige son influence sur le marché, mais en tenant compte de la relation  $p(e_1)$ . Après de légers réarrangements, la condition du premier ordre de ce second programme s'écrit

$$c_1' = p - (q_1 - e_1) \frac{dp}{de_1}$$

où la dérivée (positive)  $\frac{dp}{de_1}$ , qualifiée d'*élasticité de la frange*, est égale à  $\left( \sum_{i=2}^N \frac{1}{c_i''} \right)^{-1}$ ,  $c_i''$  étant la dérivée seconde de  $c_i$ . L'agent 1 détermine ainsi sa position en sorte que son coût marginal  $c_1'$  s'écarte du prix des permis d'un montant  $(q_1 - e_1) \frac{dp}{de_1}$ . Dans le cas, par exemple, d'une position dominante sur l'offre, ce terme correspond à un effet d'appréciation de la valeur des ventes, compensé (à la marge) par le coût d'opportunité de la restriction des transactions  $p - c_1'$ .

## ANNEXE 2

### Résolution du jeu

Les pays, indexés par  $i = 1, \dots, N$ , émettent un volume

$$e_i^j = \bar{e}_i^j (1 - a_i^j)$$

d'émission de GES durant la période  $j = 1, 2$  où  $a_i^j$  représente le taux des réductions à court terme effectuées par les entreprises du pays  $i$  durant la période  $j$ ,  $\bar{e}_i^j$  correspondant aux émissions de référence (celles que l'on observerait sans les réductions de court terme). Les actions de court terme entraînent des coûts  $C_i^j$ . Les émissions de référence de la seconde période dépendent des dépenses structurelles  $S_i$ , effectuées par le gouvernement durant la première période selon la fonction

$$\bar{e}_i^2 = \varepsilon_i(S_i)$$

La relation stratégique entre les gouvernements et l'organisme international de régulation étant du type leader-suiveur, l'équilibre du jeu est déterminé dès que les choix structurels  $\Gamma^* = \{S_1^*, \dots, S_N^*\}$ , optimaux du point de vue des gouvernements, le sont. Ils peuvent être caractérisés en deux étapes de la manière suivante. Dans la première étape, le quota global de seconde période  $Q^2$  est déterminé en tant que fonction de  $\Gamma$  :

$$Q^2(\Gamma) = \underset{Q^2}{\text{ArgMin}} G(Q^2, \Gamma)$$

où  $G(Q^2, \Gamma)$  représente le coût mondial des politiques climatiques que cherche à minimiser l'organisme international de régulation. Il s'agit du coût, économique et environnemental, de l'effort de réduction des émissions résultant de  $Q^2$  et de  $\Gamma$ .

Dans la seconde étape de résolution, on cherche à déterminer  $\Gamma^*$ . Chaque gouvernement sélectionne son choix optimal compte tenu de ses conjectures sur celui des autres gouvernements (équilibre de Nash) et de l'effet indirect de sa décision sur  $Q^2$ .  $\Gamma^* = \{S_1^*, \dots, S_N^*\}$  est un équilibre du jeu, si et seulement si

$$S_i^* = \underset{S_i}{\text{ArgMin}} (G_i(S_i, S_{-i}^*))$$

pour  $i = 1, \dots, N$ , où  $G_i \equiv C_i^1 + p^1 x_i^1 + S_i + (1 + \theta)^{-1} [C_i^2 + p^2 x_i^2 + D_i]$  est le coût de la politique climatique nationale (incluant les dommages) qui dépend des choix gouvernementaux  $(S_i, S_{-i}^*)$ , avec  $S_{-i}^* = \{S_k^* \mid k \neq i\}$ , par le truchement de  $Q^2$ . Les variables  $p^j$  et  $x_i^j$  représentent respectivement le prix des permis et la demande de permis exprimée par la région  $i$  durant la

période  $j$  ;  $\theta$  est le taux d'actualisation ;  $D_i$  mesure le dommage climatique national. Les conditions d'optimalité de l'équilibre de Nash aboutissent aux égalités suivantes, pour  $i = 1, \dots, N$

$$C_m^{LT} = p^1 + p^1 (\delta_i - \nu_i) \quad (1)$$

où  $C_m^{LT}$  est le coût marginal de réduction des émissions de long terme (réduction en période 2 par des actions en période 1) ;  $\delta_i = \frac{D_i}{D}$  est le ratio des dommages climatiques de la région  $i$  sur les dommages mondiaux, et où  $\nu_i \equiv \frac{\partial q_i^2}{\partial S_i} / \frac{\partial Q^2}{\partial S_i}$  mesure la sensibilité du quota national à une variation du quota mondial de seconde période.

La condition (1) diffère de la condition classique d'efficacité imposant l'égalité entre le coût marginal de réduction des émissions et la valeur des permis. Elle introduit une nouvelle quantité  $p^1 (\delta_i - \nu_i)$ . Le terme  $p^1 \delta_i$  est *sur-incitatif* ; il correspond à la réduction des dommages environnementaux nationaux qu'apportent indirectement les actions structurelles en permettant un quota mondial plus sévère ; le terme  $-p^1 \nu_i$  est *contre-incitatif* ; il traduit l'anticipation que les efforts structurels entraînent une réduction du quota national de seconde période.

### ANNEXE 3

#### Neutralité de la taxation nationale sur les choix publics

Considérons l'effet d'une taxe carbone nationale sur les émissions imputables, par exemple, aux équipements électroménagers d'un pays où le contenu en carbone de l'électricité est significatif. Admettons que la taxe se répercute totalement sur les prix de l'électricité. Examinons à présent l'impact de la taxe sur le bilan collectif  $B$  d'un programme public (de R&D, par exemple) réduisant les consommations des équipements électroménagers d'un montant  $e$  pour un coût  $I$ .

Sans la taxe, nous avons (en normalisant le prix de l'électricité à l'unité)  $B = B_g + B_p = -I + e$ , où  $B_g (= -I)$  et  $B_p (= e)$  désignent respectivement le bilan du programme du point de vue des ressources publiques et privées. Le programme sera appliqué si  $B$  est positif, abandonné dans le cas contraire.

L'application d'une taxe nationale  $t_e$  produit deux effets. D'une part, elle augmente la valeur des économies d'énergie dont bénéficient les ménages d'un montant  $t_e e$  (bilan privé). D'autre part, elle diminue les recettes budgétaires du même montant (bilan public). L'avantage pour les ménages de la réduction de leurs consommations d'énergie est ainsi exactement compensé par le coût budgétaire d'une moindre base fiscale. Le bilan du programme est inchangé ; la taxe nationale ne le rend pas plus attractif pour les pouvoirs publics.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- J.E. Aldy, S. Barrett, R.N. Stavins [2003]: *Thirteen plus one: a comparison of global architectures*, Fondazione Eni Enrico Mattei, Working Paper N°64.2003.
- AIE/OCDE [1999] : **Politiques énergétiques des pays de l’AIE, examen 1999**. Paris.
- J. Ashton, X. Wang [2003]: *Equity and climate: in principle and practice*, Beyond Kyoto: Advancing the international effort against climate change, report to the Pew Center on Global Climate Change, p. 61-84.
- P. M. Bernstein, D. W. Montgomery, T. F. Rutherford, G. F. Yang: [1999]: *Effects of restrictions on international permit trading: the MS-MRT Model*, **The Energy Journal**, The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation, special issue.
- G. Biglaiser, J. K. Horowitz, J. Quiggin [1995]: *Dynamic pollution regulation*, **Journal of Regulatory Economics**, 8, 33-44.
- C. Boehringer, A. Loeschl [2001]: *Market power in international emission trading: the impacts of U.S. withdrawal from the Kyoto Protocol*, Discussion Paper 01-58, ZEW, Mannheim.
- D. Bodansky [2001]: *Bonn voyage – Kyoto’s uncertain revival*, **The National Interest**, Fall.
- Commission des Communautés Européennes (CCE) [2005] : *Vaincre le changement climatique*, Communication de la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social européen et au comité des régions.
- R. Cooper [1998]: *Toward a real treaty on global warming*. **Foreign Affairs** 77 (2), 66-79.
- M. Cropper et W. E. Oates [1992]: *Environmental economics: a survey*, **Journal of Economic Literature**, Vol. XXX, p. 675-740.
- J. Edmonds, H. Pitcher, R. Sands [2004]: *Second Generation Model: An Overview*, [http://www.globalchange.umd.edu/models/SGM\\_2004\\_Overview.pdf](http://www.globalchange.umd.edu/models/SGM_2004_Overview.pdf).
- X. Freixas, R. Guesnerie, J. Tirole [1985] : *Planning under incomplete information and the ratchet effect*, **Review of Economic Studies**, 52, pp. 173-191.
- O. Godard et C. Henry [1998] : *Les instruments des politiques internationales de l’environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables*, dans Fiscalité de l’environnement, rapport au Conseil d’Analyse économique, Paris, La Documentation française.
- R. Guesnerie [2003] : *Kyoto et l’économie de l’effet de serre*, Les rapports du Conseil d’Analyse Economique, n° 39, la Documentation française, 257 p.
- R. Gibbons [1992]: **Game Theory for Applied Economists**, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- M. Grubb, T. Brewer, M. Müller, J. Drexhage, K. Hamilton, T. Sukiya, T. Aiba [2003] : *A Strategic Assessment of the Kyoto Marrakech System*, Briefing Paper N°6, The Royal Institute of International Affairs, 16 pp.
- M. Grubb, J.C. Hourcade, S. Oberthur [2001]: *Keeping Kyoto: A study of approaches to maintaining the Kyoto Protocol on Climate Change*, Rapport, Climate Strategies, [www.climate-strategies.org](http://www.climate-strategies.org).

- R. W. Hahn [1998]: *How Good Analysis and Policy Design Can Inform the Global Warming Debate*, Testimony before the Committee on Commerce U.S. House of representatives, 6 octobre.
- R. W. Hahn [1984]: Market power and transferable property rights. **Quarterly Journal of Economics**, 99, 753-765.
- M. Hoel [1993]: Harmonization of carbon taxes in international climate agreements, **Environmental and Resource Economics**, 3, p. 221-232.
- J.-C. Hourcade et F. Gherzi [2002] : *The Economics of a Lost Deal: Kyoto - The Hague - Marakesh*, **The Energy Journal**, vol. 23, 3, p. 1-26.
- International Energy Agency (IEA) [2002] : *Beyond Kyoto : Energy Dynamics and Climate Stabilisation*, OECD/IEA.
- R. Kopp, R. Morgenstern et W. Pizer [1997] : *Something for Everyone: A Climate Policy That Both Environmentalists and Industry Can Live With*, RFF Feature, Washington, DC: Resources for the Future. <http://www.weathervane.rff.org/features/feature015.html>.
- A. S. Manne, R. G. Richels [2001]: *US rejection of the Kyoto Protocol: the impact on compliance costs and CO<sub>2</sub> emissions*, Working Paper 01-12, AEI-Brooking Joint Center for Regulatory Studies.
- M. Meinshausen [2005]: *On the risk of overshooting 2°C*, Conference paper, Avoiding Dangerous Climate Change, MetOffice, Exeter, 1-3 February 2005.
- A. Meyer [2000]: **Contraction and Convergence: the Global Solution to Climate Change**, Green Books Ltd.
- A. Michaelowa, M. Stronzik [2002]: *Transaction costs of the Kyoto Mechanisms*, HWWA Discussion Paper, 175.
- D. W. Montgomery [1972]: *Markets in licences and efficient pollution control programs*, **Journal of Economic Theory**, 5, 395-418.
- B. Müller [2004] : *The Kyoto Protocol: Russian Opportunities*, Background Paper prepared for “Russia an the Kyoto Protocol: Issues and Challenges”, meeting held at the Royal Institute of International Affairs on 17 march 2004, The Royal Institute of International Affairs, 12 p.
- R. Newell, W. Pizer, J. Zhang [2003]: *Managing permit markets to stabilize prices*, Resources For the Future, Discussion Paper N°. 03-34.
- R. Newell, W. Pizer [2003]: *Regulating stock externalities under uncertainty*, **Journal of Environmental Economics and Management**, 45, p. 416-432.
- W. Nordhaus [1998]: *Revised estimates of the impacts of climate change damages*, Report, <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/impact>.
- W. Nordhaus [2001]: *After Kyoto: alternative mechanisms to control global warming*, Communication, American Economic Association and Association of Environmental and Ressource Economists, Atlanta, Georgia, Jan. 4.
- OCDE [1992]: **Climate Change: Designing a Practical Tax System**, Paris.
- P. Rey, R. Salanier [1990]: *Long-term, short term, and renegotiation: on the value of commitment in contracting*, **Econometrica**, 58, pp. 597-620.
- S. Smith [1998]: *The distibutional consequences of taxes on energy and the carbon content of fuels: a review of political issues*, Working Paper, The Institute for Fiscal Studies.

T. Tietenberg [1985]: **Emission Trading, An Exercise in Reforming Pollution Policy**, Resource For the Future, Washington, D.C.

D. P. Van Vuuren, M. G. J. den Elzen, M. M. Berk, P. Lucas, B. Eickhout, H. Eerens, R. Oostenrijk [2003]: *Regional costs and benefits of alternative post-Kyoto climate regimes – comparison of variants of the Multi-stage and Per Capita Convergence regimes*, RIVM, rapport 728001025/2003.

M. L. Weitzman [1974]: *Prices vs. quantities*, **Review of Economic Studies**, 41 (4), 477-491.

J. P. Weyant, J. N. Hill [1999]: The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation, **The Energy Journal**, numéro spécial, 201 pp.

E. Woerdman [2002] : *Why did the EU Propose to Limit Emissions Trading? A Theoretical and Empirical Analysis*, in J. Albrecht (éd.) **Instruments for Climate Policy - Limited versus unlimited flexibility**, Chap. 4, New Horizons In Environmental Economics, Edward Elgar, Cheltenham, UK.

---

<sup>1</sup> La Convention Climat est l'organe exécutif en matière de lutte internationale contre le réchauffement planétaire.

<sup>2</sup> Les exemples les plus courants d'actions de réduction des émissions de GES sont les mesures d'efficacité énergétique (installation de lampes basses consommation), les substitutions énergétiques dans l'industrie (souvent du charbon ou du fioul vers le gaz), les programmes de réduction de la consommation des véhicules, etc.

<sup>3</sup> Les projets MDP doivent répondre à des procédures très strictes afin de vérifier que les crédits d'émission réclamés par les investisseurs correspondent bien à des réductions réelles, et éviter ainsi les effets d'aubaine.

<sup>4</sup> Du moins, dans un premier temps, comme nous le verrons.

<sup>5</sup> Les performances d'efficacité économique des permis et de la taxation sont, quant à elles, souvent considérées équivalentes à condition, bien sûr, que leurs paramètres correspondent au même effort de réduction des émissions. Nous remettons cette équivalence en question dans la suite.

<sup>6</sup> Cette remarque semble en contradiction avec le résultat classique de Weitzman [1974] sur le choix des instruments de politique, en situation d'incertitude sur les coûts marginaux de prévention et quand leur pente est supérieure à celle des dommages marginaux. Sous ces conditions, Weitzman montre qu'un instrument quantité – les permis négociables – est peu efficace et qu'il faudrait lui préférer un instrument prix – la taxation. L'effet de serre étant un phénomène de stock de pollution s'accumulant très lentement, son dommage marginal, quoique de valeur très incertaine, est quasiment constant sur de longues périodes (Newell et Pizer, [2003]). En revanche, représentés sur la même échelle, les coûts de réduction des émissions, très incertains eux aussi, sont fortement croissants (ibid.). L'analyse de Weitzman semble donc ici pouvoir s'appliquer. Mais il serait peu pertinent de transposer ainsi les résultats d'un modèle statique relevant des pollutions de flux au cas de la régulation dynamique de l'effet de serre. Car le caractère nécessairement séquentiel d'une politique de contrôle des émissions de GES permet d'envisager l'ajustement de l'instrument, quel qu'il soit, en fonction de l'amélioration de l'information. Dès lors, la comparaison des performances en situation d'incertitude sur les coûts n'apparaît pas ici discriminante.

<sup>7</sup> La procédure de plafonnement du prix des permis (*safety-valve*) a été imaginée par l'institut de recherche indépendant *Resources For the Future* (Kopp et al. 1997) et semble pouvoir compter sur un certain soutien international (IEA, 2002). L'idée est d'autoriser les parties ayant des difficultés à respecter leur quota à régulariser leur situation en versant à un fonds d'observance (*compliance fund*) un montant égal au prix-plafond pour chaque tonne d'émission excédentaire. La contrainte des quotas peut être ainsi relâchée, en contrepartie d'un paiement libératoire, quand les coûts de réduction des émissions se révèlent plus élevés que prévu. De fait, ce mécanisme fonctionne comme un instrument indirect de transfert ou d'emprunt de permis, géré et garanti par la CC. D'une part, celle-ci s'engage à satisfaire les demandes de permis additionnels, mais elle se donne, d'autre part, la possibilité de compenser les émissions excédentaires : soit en réinvestissant les paiements libératoires dans des projets générateurs de crédits d'émission dans les pays du Sud, soit en révisant à la baisse les quotas post-2012.

<sup>8</sup> Il se peut que l'on observe, dans une première phase, la coexistence du SPEN avec un ou plusieurs autres systèmes nationaux ou régionaux. Cela pourrait résulter d'une initiative des Etats-Unis cherchant à attirer les principaux pays du Sud au sein d'un régime alternatif taillé à leur convenance. La fragmentation des systèmes de permis n'est cependant pas viable à long terme. La nature globale et cumulative du risque climatique impose en effet la recherche d'objectifs globaux de contrôle des émissions à la sévérité croissante. D'une façon ou d'une

---

autre, les systèmes isolés seront poussés à la rationalisation. Soit ils s'accrocheront à des objectifs sérieux et, dans ce cas, devront fusionner pour réduire les coûts. Soit ils ne pourront aller au-delà d'objectifs symboliques et finiront par perdre leur légitimité et se dissoudre.

<sup>9</sup> Van Vuuren et al. [2003] évaluent trois types de scénarios où l'élargissement et la consolidation de l'action internationale résultent de contraintes différenciées selon les capacités et les responsabilités nationales, mesurées respectivement par le PIB/tête et les émissions/tête. Au-delà d'un premier seuil (de capacité et de responsabilité), les pays, auparavant exemptés de contraintes, reçoivent des quotas indexés (des objectifs d'intensité en carbone) qui, après le dépassement d'un second seuil, deviennent absolus. Les résultats, déduits d'hypothèses raisonnables pour un processus d'élargissement et de consolidation adapté à l'objectif global de 550 ppmv, indiquent que la plupart des pays intègrent le régime des quotas absolus dès 2030.

<sup>10</sup> Le caractère équitable de l'allocation égalitaire des permis est parfois remis en question en observant que la dépendance des populations à l'énergie pour la satisfaction de leurs besoins fondamentaux (par exemple, le chauffage) varie d'un point à l'autre du globe (Godard et Henry [1998], Ashton et Wang [2003]). Ignorant ces facteurs, l'allocation par tête serait donc fondamentalement inéquitable. Sur le plan des principes, cette critique a certes le mérite de faire comprendre : (1) que l'allocation par tête ne peut être jugée équitable que dans un monde où les hommes seraient parfaitement mobiles, libres de changer, sans coût ni contrainte, leur lieu de résidence ; et, par conséquent, (2) que son application ne peut être réclamée immédiatement dans la mesure où la mobilité internationale est actuellement limitée par les lois nationales, le coût de l'immigration, et divers liens familiaux et personnels. Mais, toujours sur le plan des principes, il faut dire que l'argument porte moins contre la notion de convergence à long terme vers la règle égalitaire, car il s'estompe sur longue période : plus le temps passe après que la terre ait été déclarée en danger, plus les opportunités d'adaptation des comportements à bas coût (y compris par le changement de résidence) se multiplient, et moins les personnes peuvent être jugées « innocentes » vis-à-vis des contraintes liées à leurs modes de vie.

<sup>11</sup> Les données sont issues de la revue (actualisée) de Weyant et Hill [1999] couvrant les résultats de 12 modèles reconnus de simulation des engagements de Kyoto. Cela permet d'obtenir autant d'estimations concurrentes des émissions tendancielle et des fonctions de coût (Hourcade et Gheris [2002]). Seuls les résultats moyens d'application du modèle de Hahn sont ici présentés.

<sup>12</sup> L'auteur tient la démonstration de ce résultat accessible à la demande.

<sup>13</sup> L'idée, déjà fort audacieuse sur le plan politique, semble, de surcroît, impraticable techniquement : trop de paramètres inobservables sont en jeu lorsqu'il s'agit de déterminer les politiques que les gouvernements devraient adopter. Prenons l'exemple des programmes publics de R&D. L'analyse économique en justifie certes théoriquement la nécessité par des défaillances de marché. Mais elle est bien en peine, par l'insuffisance de l'information et des méthodes, d'en déterminer l'ampleur et l'orientation, d'autant qu'ils peuvent fausser les conditions de concurrence. Tout au plus, peut-on imaginer que des études publiques comparatives, comme celles de l'OCDE (AIE/OCDE [1999]), signalent des déséquilibres manifestes et servent ainsi à encourager les efforts de certains pays dans tel ou tel domaine de la maîtrise de l'énergie, des énergies renouvelables, ou encore des énergies du futur.

<sup>14</sup> Le budget d'émission optimal doit aboutir à un prix des permis égal au dommage climatique marginal.

<sup>15</sup> Il s'agit ici de réductions nettes, c'est-à-dire de réductions brutes diminuées des abattements qui, même sans l'action de long terme, auraient néanmoins été effectués en seconde période (par les actions de court terme justifiées au prix courant des permis). Avec cette convention, l'effet contre-incitatif et l'effet sur-incitatif sont facilement comparables. Dans l'application numérique suivante, les coûts marginaux d'abattement de court terme sont supposés quadratiques et sont estimés à partir des résultats du modèle SGM (Edmonds et al. [2004]).

<sup>16</sup> Biglaiser et al. (1995) montrent que si les participants à un système dynamique de permis d'émission anticipent que le régulateur révisera ses objectifs futurs en fonction de leurs choix d'investissement de dépollution, ceux-ci seront nécessairement biaisés. Mais ces auteurs n'aboutissent pas à une caractérisation formelle des distorsions dynamiques parce que leur modèle en temps continu ne se prête pas à une solution analytique simple.

<sup>17</sup> Les paramètres de sensibilité au quota de seconde période – respectivement, 82% et 108% pour les Etats-Unis et la Chine – sont ici supérieurs au taux d'indexation des plafonds vis-à-vis des émissions tendancielle (70%) car celui-ci doit être corrigé du ratio, supérieur à l'unité, entre émissions brutes et nettes (cf. note 15).

<sup>18</sup> Une taxe est dite *régressive* lorsqu'elle pèse relativement plus sur le budget des ménages pauvres que sur celui des riches.

<sup>19</sup> Il convient d'observer que ce coût financier a pour contrepartie les programmes d'intérêt commun que la taxe internationale permettrait de financer.

<sup>20</sup> La cohérence dynamique de la taxation en tant qu'instrument de régulation environnementale est formellement démontrée par Biglaiser et al. [1995] pour une fonction de dommages linéaires.