

ALAIN BERNARD  
MARC VIELLE<sup>1</sup>

# COMMENT ALLOUER UN COÛT GLOBAL D'ENVIRONNEMENT ENTRE PAYS : PERMIS NÉGOCIABLES VS TAXES OU PERMIS NÉGOCIABLES ET TAXES ?

**RÉSUMÉ.** Dans un monde d'efficacité parétienne (ou de premier rang), l'internalisation des externalités telles que la pollution peut être réalisée par des taxes ou par des marchés de permis, aussi bien dans un pays qu'à l'échelle internationale. La taxe environnementale est alors égale au coût social marginal de réduction des émissions de pollution, c'est-à-dire à la perte économique entraînée par une variation unitaire des émissions. Lorsque préexiste une fiscalité non neutre, visant en particulier à atteindre les objectifs généraux habituels que sont le financement des dépenses publiques et la redistribution des revenus ou du pouvoir d'achat, une telle identité ne se vérifie plus nécessairement.

Le modèle GEMINI-E3, dans une nouvelle version dénommée GEMINI-E3/*GemWTraP* qui a été développée pour évaluer les aspects environnementaux des politiques énergétiques et tout particulièrement la prévention du changement climatique, est mis à contribution pour mesurer, sur des situations existantes et avec des données réelles, l'importance et les effets de cette divergence entre taxe sur le car-

bone et coût marginal de réduction des émissions. En plus de l'interaction entre fiscalité environnementale et fiscalité traditionnelle, le modèle prend en compte les interactions qui transitent par les marchés internationaux, et en particulier ceux des produits énergétiques fossiles, charbon, gaz et pétrole, qui sont à l'origine d'une part majeure de l'effet de serre.

Cet article présente ainsi des simulations du protocole de Kyoto dans diverses configurations : sans ou avec permis négociables, et pour ces derniers, permis basés sur les taxes sur le carbone ou permis basés sur les coûts marginaux. *A priori* ces derniers sont globalement plus efficaces mais l'écart est faible, de même qu'est relativement faible l'écart entre la situation sans permis négociables (c'est-à-dire avec uniquement des taxes nationales) et la situation avec permis négociables.

La mise en œuvre de la solution des permis basés sur les coûts marginaux nécessite, en plus de l'institution d'un marché international de permis, l'imposition de taxes nationales (éventuellement à taux négatif, c'est-à-dire de subventions) per-

1. ALAIN BERNARD est Ingénieur général des Ponts et chaussées, membre de la section « Affaires économiques » du Conseil général des Ponts et chaussées (alain.bernard@equipement.gouv.fr).

MARC VIELLE est économiste au Commissariat à l'énergie atomique, détaché à l'Institut de développement économique et industriel, Toulouse (mvielle@cict.fr).

Les auteurs sont redevables aux deux rapporteurs de critiques et de suggestions qui ont permis d'améliorer la présentation de l'étude.

mettant de corriger les écarts qui se manifestent d'un pays à l'autre entre coût marginal social et coût marginal individuel, qui

est le montant total qui doit être imputé aux agents économiques.

Classification *JEL* : D58 ; H23 ; Q43.

## T axes environnementales et coût marginal de réduction des émissions dans le cas parétien et en optimum de second rang

Le titre du présent article peut paraître abscons, voire surprenant ou provocateur. Pour la plupart des économistes de l'énergie et des modélisateurs, il y a identité entre la taxe à instaurer pour internaliser des coûts externes d'environnement et le « coût marginal de réduction des émissions », c'est-à-dire la perte économique qu'entraînerait une baisse unitaire des émissions, les deux étant égaux au dommage marginal. De telles relations marginalistes se vérifient dans un monde dit de « premier rang » ou d'optimum parétien. Elles ne se retrouvent pas nécessairement dans un contexte de « second rang », et en particulier lorsqu'il existe des taxes qui ne sont pas neutres du point de vue de l'efficacité parétienne, c'est-à-dire empêchent la réalisation d'un optimum parétien.

Les économistes et en particulier les spécialistes de l'économie publique et de la fiscalité savent que le seul outil fiscal « neutre » est ce que l'on appelle des « transferts forfaitaires », c'est-à-dire des transferts entre catégories d'individus ou de ménages établis sur la base de critères que seul le décideur politique définit et connaît, afin de ne pas entraîner des modifications non souhaitées des comportements des agents économiques, par exemple une moindre ardeur au travail ou un moindre effort de créativité de la part de personnes soumises à un prélèvement fiscal très élevé (et de manière symétrique pour des personnes bénéficiaires de transferts importants). Mais les agents économiques ne sont pas dupes, sur le long terme, et finissent par établir des corrélations entre leurs propres caractéristiques et le prélèvement fiscal auquel ils sont soumis. De sorte que les « transferts forfaitaires » n'ont d'existence que sur le papier.

De longue date, et en particulier depuis un article fondateur de Ramsey, les économistes acceptent l'idée que la fiscalité a un coût qui est lié aux distorsions du système de prix qu'elle introduit, et qu'il s'agit donc de trouver le système fiscal qui, tout en permettant d'atteindre les objectifs visés (le financement des dépenses publiques et en particulier des « biens publics », la redistribution du revenu ou du pouvoir d'achat entre les consommateurs/ménages), entraîne la perte économique minimale. Ceci se détermine au moyen de modèles théoriques dits d'optimum de second rang, dont le principe est de rendre maximum une fonction d'utilité collective reflétant les objectifs visés par la fiscalité en ajoutant aux variables et contraintes du modèle walrasien les variables et contraintes de la fiscalité. Le travail pionnier dans la technique de l'optimum de second rang est l'article de Marcel Boiteux traitant du problème connexe des péages d'équilibre, sur lequel se sont appuyées toutes les contributions majeures suivantes et en parti-

culier celle de Diamond et Mirrlees, lesquels ont présenté un cadre global cohérent pour la fiscalité proprement dite<sup>2</sup>.

Que la fiscalité « classique » et la fiscalité environnementale interagissent est une évidence. Le constat d'une telle interaction a été fait depuis longtemps, notamment en ce qui concerne l'effet de serre et la maîtrise des émissions des gaz produisant cet effet. Ceci a donné lieu à une littérature abondante et pour le moins confuse sur le « double-dividende », les résultats obtenus étant évidemment dépendants du modèle retenu pour représenter la fiscalité.

L'existence d'un véritable phénomène de double dividende paraît d'ailleurs en lui-même peu crédible. On ne voit pas en effet comment le fait d'ajouter une contrainte à un système économique peut produire un gain net – indépendamment de l'avantage environnemental direct – tel que le suggère cette théorie<sup>3</sup>. À moins évidemment que la fiscalité ne soit pas optimale dans la situation initiale, mais on ne voit pas pourquoi elle le deviendrait avec la prise en compte des nouvelles contraintes environnementales. Il faudrait à tout le moins essayer de voir quels étaient les obstacles à la mise en œuvre d'une fiscalité optimale, ce qui impliquerait au préalable d'en définir précisément les outils disponibles et les objectifs. Un exemple caricatural mais d'une importance économique majeure (notamment avec le mécanisme dit d'air chaud) est celui des anciens pays de l'Est, et tout particulièrement de la Confédération des États Indépendants. Certes la très forte subvention de l'énergie (pour ne pas dire la quasi-gratuité) est une distorsion fiscale considérable, qui entraîne à l'évidence des pertes économiques très élevées, mais comment la réduire, et quels mécanismes lui substituer pour assurer un niveau de vie minimum à certaines catégories de la population ?

Dans le cas le plus pertinent du point de vue théorique, et aussi le plus intéressant pour la compréhension des phénomènes et des enjeux, qui est celui où la fiscalité initiale est optimale, il apparaît que les identités marginalistes évoquées plus haut n'ont pas *a priori* de raison de subsister, et la taxe environnementale et le coût marginal d'abattement<sup>4</sup> peuvent très bien, sinon véritablement diverger – ce qui paraît peu vraisemblable –, du moins différer suffisamment pour qu'il y ait des incidences sur l'utilisation de la fiscalité à des fins environnementales. Examiner ces relations dans un cadre économique cohérent (c'est-à-dire en particulier un modèle économique bouclé, et non pas par des raisonnements et modèles d'équilibre partiel) est donc indispensable.

Il convient de noter qu'un petit nombre d'études et de modélisations appliquées fournissent, directement ou indirectement, des évaluations de taxe sur le carbone et de coût d'abattement ou de perte économique faisant apparaître une divergence entre les deux grandeurs. Citons l'étude, à la fois théorique et appliquée, de Bovenberg et Goulder (1996) et les résultats numériques du modèle CICERO (Holsmark, 1998). Peut-être plus intéressante est l'étude de grande ampleur conduite aux États-Unis par l'Energy Information Administration (EIA) du Department of Energy sur les impacts du protocole de Kyoto sur les marchés énergétiques américains et l'activité économique, publiée en octobre 1998, du fait

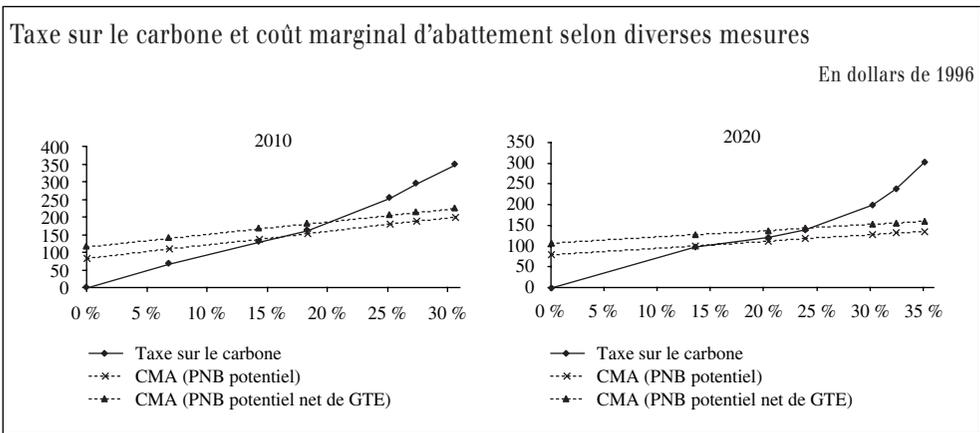
2. Se reporter à Guesnerie (1995) pour une présentation d'ensemble de la théorie pure de la fiscalité et de l'utilisation des techniques d'optimum de second rang.

3. Les cas véritables de double dividende que l'on peut mettre en évidence dans ce contexte sont à la fois d'une très grande subtilité et d'une importance économique pratiquement négligeable (voir Bernard, 1999).

4. On utilisera désormais, par souci de compacité, le néologisme « coût marginal d'abattement » (acronyme CMA) qui est la traduction de l'anglais.

qu'elle ne s'appuie pas, comme la plupart des autres évaluations, sur un modèle d'équilibre général mais sur un modèle de simulation énergétique détaillé, couplé à un modèle macroéconomique (EIA, 1998). L'analyse ne détermine pas directement un coût marginal d'abattement associé à chaque scénario de réduction des émissions de gaz à effet de serre mais la comparaison des scénarios et des pertes correspondantes permet, par des ajustements économétriques, d'en extraire une mesure et même plusieurs puisque sont évaluées à la fois la baisse du PNB réel et celle du PNB potentiel. Celle qui apparaît la plus pertinente dans une perspective de moyen-long terme est la baisse du PNB potentiel, corrigée par ailleurs des gains des termes de l'échange qui représente mieux, comme on aura l'occasion de le montrer plus loin, le coût de distorsion fiscale provoquée par la taxe sur le carbone. Les résultats sont représentés dans le GRAPHIQUE 1.

GRAPHIQUE 1



Source : Energy Information Administration, Department of Energy, Washington DC.

Elle fait apparaître, aussi bien en 2010 qu'en 2020 et pour chacune des mesures, que le coût marginal est d'abord supérieur à la taxe puis que, pour les niveaux élevés d'abattement, il devient inférieur. Il n'y a donc pas identité entre taxe sur le carbone et coût marginal d'abattement, et ceci résulte (entre autres) de l'effet distorsif de la fiscalité existante.

À cette première interaction, s'en ajoute une seconde qui est celle transitant par le commerce extérieur, et notamment les échanges de biens susceptibles de générer des émissions de gaz à effet de serre. La mise en œuvre de politiques de changement climatique va se traduire par une baisse de la consommation de produits énergétiques fossiles, et par suite par une baisse de leurs prix sur les marchés internationaux (du moins en supposant que ces derniers sont régis par des mécanismes concurrentiels). Il en résultera des transferts réels au bénéfice des pays importateurs et au détriment des pays exportateurs, qui sont connus sous le terme de gains (ou pertes) des termes de l'échange. Ce phénomène est loin d'être mineur, et l'on peut même dire qu'il est prépondérant tant que les niveaux requis de réduction des émissions restent modérés.

Qu'enfin, les deux interactions décrites ci-dessus « interagissent entre elles » est aussi une évidence, qui ne fait que rendre plus complexe la compréhension du phénomène d'ensemble qu'est la maîtrise d'une pollution de caractère international. Du point de vue théorique, il s'agit alors d'étudier l'équilibre entre des économies de second rang, régies chacune par des systèmes fiscaux optimisés. Cette analyse a été effectuée de manière relativement exhaustive dans une communication présentée concurremment à celle dont fait l'objet le présent article, à un récent congrès conjointement organisé à Paris par l'Agence internationale de l'énergie, l'Energy Modeling Forum et l'International Energy Workshop<sup>5</sup>. Cette analyse définit les concepts pertinents, et notamment le coût marginal d'abattement dans le cas d'une économie ouverte, et compare du point de vue de l'efficacité économique le système de permis internationaux *basé sur les taxes* (qui conduisent ou équivalent à l'alignement des taxes sur le carbone) et le système *basé sur les coûts marginaux d'abattement* (qui conduisent à l'alignement des coûts marginaux). L'objet du présent article est de passer de la théorie à l'application, c'est-à-dire de mener cette comparaison sur la base de situations existantes et de données réelles, au moyen d'un modèle d'équilibre général calculable.

Après avoir présenté le modèle, qui a déjà fait l'objet de plusieurs publications et de nombreuses communications, de la manière la plus ramassée possible, cet article expose les résultats de l'évaluation et leur commentaire<sup>6</sup>. Il tire enfin les principaux enseignements des simulations effectuées et des enjeux pour la négociation internationale engagée sur les politiques de changement climatique.

## Le modèle GEMINI-E3/*GemWTraP*

Le modèle *GEMINI-E3* constitue une famille de modèles élaborés et gérés dans le cadre d'une collaboration entre le ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement et le Commissariat à l'énergie atomique, dans le but d'analyser les politiques énergétiques en relation avec leurs impacts environnementaux et en particulier ceux liés à l'effet de serre. Il représente à ce jour le seul modèle français permettant l'évaluation, dans un cadre cohérent et bouclé tant au niveau national qu'international, des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre concertées au niveau international, lesquelles ont été initiées par le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro puis concrétisées dans le protocole de Kyoto<sup>7</sup>. Le modèle a été utilisé par la mission interministérielle de l'effet de serre<sup>8</sup> et contribue actuellement aux travaux de l'Energy Modeling

5. Respectivement, Bernard (1999) et Bernard & Vielle (1999).

6. Pour une description plus complète du modèle, se reporter à Bernard & Vielle (1998a).

7. Parmi les modèles d'équilibre général calculables bouclés au niveau mondial, on peut citer : ABARE-GTEM, G-Cubed, GREEN, EPPA, MERGE, MS-MRT, RICE et DICE, SGM, WorldScan. La description de ces modèles se trouve dans les articles suivants : ABARE (1996) ; McKibbin & Wilcoxon (1998) ; Burniaux, Martin & al. (1992) ; Yang, Eckause, Ellerman & Jacoby, (1996) ; Manne, Mendelsohn & Richels (1995) ; Bernstein, Montgomery, Rutherford & Gui-Fang Yang (1999) ; Nordhaus & Boyer (2000) ; Edmonds, Pitcher, Barns, Baron & Wise (1995) ; Geurts, Gielen, Nahuis, Tang & Timmer (1997). Pour une description typologique de ces modèles, voir Wyant & Hill (1999), et pour la présentation des scénarios de simulation du protocole de Kyoto réalisés avec ces modèles, voir le numéro spécial de mai 1999 de *The Energy Journal*.

8. M.I.E.S. (2000).

Forum (EMF) 18<sup>9</sup> qui regroupe une dizaine d'équipes internationales de modélisation avec un cahier des charges précis et un thème commun d'analyse, en l'occurrence les aspects de commerce international des politiques de changement climatique.

### Les diverses formes et utilisations du modèle GEMINI-E3

GEMINI-E3/*GemWTraP* appartient à une famille de modèles fondée sur une structure théorique commune, comportant en outre des modèles purement nationaux mais très désagrégés, GEMINI-E3 *XL France* et GEMINI-E3 *XL Deutschland*, qui permettent d'approfondir les aspects sectoriels (88 branches pour la France et 59 branches pour l'Allemagne), et une version « électrique » du modèle mondial, GEMINI-E3/*E*, qui comporte une représentation de l'offre d'électricité de la France par un module technologique permettant de comparer les différentes filières de production et de déterminer ainsi, sur la base des coûts économiques, la gestion courante des centrales existantes et l'investissement en nouvelles unités de production. Ce dernier modèle a été en particulier utilisé pour évaluer la contribution de l'énergie nucléaire à la politique de changement climatique, et *a contrario* le coût d'un moratoire nucléaire qui serait mis en œuvre en France<sup>10</sup>.

### Les principes fondateurs et les principales caractéristiques

Les principes fondateurs du modèle GEMINI-E3/*GemWTRAP* sont les suivants :

- une représentation de l'économie à partir du paradigme de l'équilibre général, où tous les marchés sont équilibrés par le système des prix ;
- une couverture géographique mondiale avec un découpage par zones permettant de représenter les pays ou les régions jouant un rôle déterminant dans la mise en œuvre du protocole de Kyoto : États-Unis, Union européenne, Japon, l'ex-Union soviétique, les pays exportateurs d'énergie, le Reste du Monde, enfin, ce qui est l'exception dans ce type de modèle, la France pour laquelle l'on dispose ainsi de résultats propres (et non pas englobés dans l'ensemble européen). Les trois premiers pays plus la France sont ainsi « représentatifs » de l'ensemble OCDE sans évidemment le couvrir en totalité ; de même, ces pays plus l'ex-Union soviétique, sont « représentatifs » de l'annexe I du protocole de Kyoto. Il a été préféré de fonder le modèle sur quelques pays, ou ensembles de pays, pour lesquels l'on dispose de données statistiques fiables et détaillées, plutôt que de rechercher une couverture géographique exacte des zones géopolitiques distinguées dans le protocole de Kyoto ;
- une description sectorielle à même d'isoler les produits énergétiques et les secteurs gros consommateurs d'énergie : 8 produits et secteurs sont ainsi décrits, le charbon, le gaz, le pétrole brut, les produits pétroliers, l'électricité, l'agriculture, les secteurs intensifs en énergie, les autres biens et services ;

9. Pour une description des travaux de l'EMF consulter le site internet <http://www.stanford.edu/group/EMF/>.

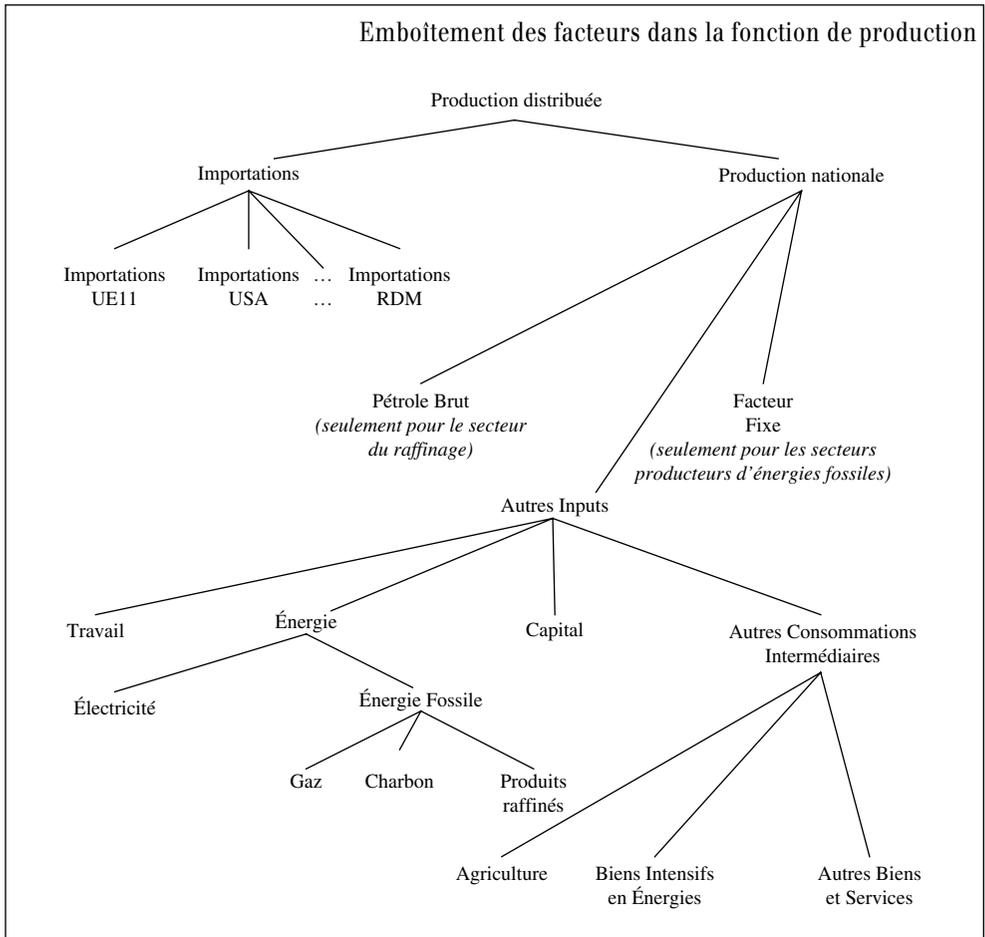
10. Bernard & Vielle (2000b).

— une représentation des échanges internationaux *via* une modélisation des échanges de biens et services entre les sept zones, indispensable si l'on veut appréhender correctement les transferts réels de revenus résultant de la modification des termes de l'échange ;

— une représentation aussi détaillée que possible de la fiscalité indirecte, indispensable pour mesurer des surplus ou des coûts de bien-être, lesquels résultent comme l'on sait des distorsions existantes ou nouvelles du système de prix à la production et à la consommation.

La structure détaillée du modèle découle de ces caractéristiques fondatrices. La production est décrite par une arborescence de fonctions CES exprimant les différents arbitrages auxquels font face les producteurs, telle que représentée dans le GRAPHIQUE 2.

GRAPHIQUE 2



La fonction de demande des ménages est issue de la fonction de dépense linéaire dite de Stone-Geary qui, sans être totalement flexible, permet néanmoins

d'exprimer les principales substituabilités entre biens de consommation finale. Étant « intégrable », c'est-à-dire issue d'une fonction d'utilité, elle permet de calculer de manière à la fois simple et cohérente le surplus des consommateurs, et par suite le coût macroéconomique des politiques (*cf. infra*).

Les échanges internationaux sont décrits par les fonctions de demande d'importation de chaque pays en provenance de chacun des autres pays ou régions individualisés dans le modèle, selon l'hypothèse dite d'Armington. Rappelons que celle-ci revient à considérer que les « mêmes » biens produits dans deux pays différents ne sont pas des substituts parfaits, et que par suite les agents économiques (les entreprises en l'occurrence) arbitrent entre production nationale et importations en fonction des prix relatifs des biens nationaux et importés<sup>11</sup>. Cette hypothèse, qui soulève des difficultés indéniables car elle tend à sous-estimer l'incidence des prix sur la concurrence entre pays, notamment pour des produits sensibles comme les biens intermédiaires (qui se trouvent être par ailleurs les biens à contenu élevé en énergie), est néanmoins inévitable en raison du degré relativement agrégé de ce type de modèles. Le modèle ne décrit évidemment pas de fonction d'exportations, du fait que pour chaque pays celles-ci résultent directement des demandes adressées par les autres pays.

Enfin, si certains modèles tels en particulier G-Cubed, qui est proche dans sa structure des modèles macroéconomiques traditionnels, décrivent les mouvements de capitaux, le modèle GEMINI-E3 les exclut (ou du moins les traite de manière exogène), et incorpore une contrainte d'équilibre de la balance commerciale. L'obtention de cet équilibre, qui résulte du jeu des taux de change (réels) entre pays, est imposée dans le but de mesurer le coût de bien-être des politiques de changement climatique, et en particulier d'en suivre l'évolution au cours du temps.

### Une spécificité du modèle : la mesure et l'analyse des facteurs explicatifs du coût macroéconomique des politiques de changement climatique

Le coût des politiques de changement climatique, dans leurs diverses configurations de mise en œuvre, est un indicateur clé de leur évaluation. Dans le cas d'actions visant à réduire la consommation de certains biens, et passant par des mesures fiscales ou des instruments équivalents, les agrégats macroéconomiques tels que le PIB ou la consommation des ménages en volume ne sont pas des indicateurs pertinents puisque, par définition, ils sont calculés à structure de prix donnée, ignorant de ce fait les effets sur le bien-être de la modification des prix relatifs<sup>12</sup>.

La seule mesure pertinente du coût de bien-être<sup>13</sup> est le surplus du consommateur, établi à partir soit de la variation équivalente de revenu (VER), soit de la variation compensatrice de revenu (VCR). Bien que théoriquement légèrement différents, les deux concepts donnent des mesures très proches, du fait que l'on reste à des niveaux de modification des prix d'ampleur limitée, et que l'énergie ne représente qu'une part faible des coûts de production ou du budget des ménages.

11. Le degré de concurrence peut être modulé par l'utilisation d'une élasticité de substitution plus ou moins forte.

12. Voir, en particulier sur la question générale de la mesure du coût macroéconomique, Gaskins & Wyant (1993).

13. Dans l'article, les termes de surplus des consommateurs, coût de bien-être, perte de bien-être, coût macroéconomique sont synonymes.

Le modèle calcule chaque année, et pour chaque pays/région individualisé, le surplus du (c'est-à-dire des) consommateur(s). Les surplus obtenus peuvent être agrégés, pour l'ensemble des pays en les pondérant par les taux de change, ou pour l'ensemble de la période passée sous revue dans le modèle, par actualisation avec un taux représentatif du coût du capital pour le pays considéré.

Le surplus des consommateurs n'est représentatif de la variation globale de bien-être que si les autres éléments de la demande finale, exportations exceptées, sont maintenus constants. C'est le cas de la demande finale des administrations, qui est exogène dans le modèle. S'agissant de l'investissement productif, qui est normalement endogène dans le modèle et sensible aux variations de prix relatifs (dont notamment le coût d'usage du capital), il a été introduit une contrainte de stabilité du volume global tous secteurs confondus, la répartition par branche demeurant néanmoins libre et régie par le système de prix. En tout état de cause, les variations du volume global d'investissement obtenues sans la contrainte (mais sous l'hypothèse d'un taux d'épargne des ménages donné) étaient relativement faibles et non véritablement significatives d'un effet des politiques étudiées sur l'accumulation du capital et par suite sur la croissance. L'on peut dire, en quelque sorte, que le modèle dissocie les problèmes d'évaluation des contraintes d'environnement, des aspects de la croissance à long terme.

Dans une économie fermée, le surplus des consommateurs reflète l'effet de substitution pur de la taxation, soit ce que l'on appelle le *coût de charge morte* (*deadweight loss* dans la terminologie anglo-saxonne). Dans une économie ouverte, des effets de revenu se superposent à ces effets de substitution, ce sont ceux qui sont transmis par la modification des prix relatifs sur les marchés internationaux. Les gains ou pertes des *termes de l'échange* – comme ils sont dénommés dans la littérature spécialisée – qui en résultent peuvent être importants, même prédominants dans certains cas, et venir compenser ou alourdir le coût direct, d'origine interne. Le TABLEAU 1 précise l'algèbre de la mesure du coût de bien-être dans une telle situation d'économie ouverte.

TABLEAU 1

Algèbre de la mesure du coût de bien-être				
S	=	$\Delta R$	-	VCR
(Surplus total)		(Variation de revenu)		(Variation compensatrice de revenu)
	=	-CCM	+	G
		(Coût de charge morte)		(Gains nets des termes de l'échange)
G	=	$\Sigma EXP \Delta P_{EXP}$	-	$\Sigma IMP \Delta P_{IMP}$
	$\equiv$	$\Sigma P_{IMP} \Delta IMP$	-	$\Sigma P_{EXP} \Delta EXP$

Le surplus total et les gains nets des termes de l'échange peuvent être calculés directement à partir des résultats des scénarios. Les formules données au TABLEAU 1 permettent de calculer le coût de charge morte, qui représente, comme il a été dit précédemment, l'effet pur de substitution de la réduction des émissions de pollution.

S'agissant du coût marginal d'abattement, sa définition peut paraître évidente mais sa détermination exacte est un peu plus complexe.

Selon l'analyse théorique qui peut être faite<sup>14</sup>, ce qui est pertinent dans un échange de droits avec d'autres pays est le coût marginal défini comme la *perte de bien-être à prix internationaux constants*. D'autre part, cette perte doit être déflatée par la valeur sociale des biens échangés, puisque le « paiement » des droits à polluer s'effectue *in fine*, et en termes réels, par des biens importés. Or les valeurs sociales des biens diffèrent des prix de marché d'une quantité qui est le *coût marginal des fonds publics*<sup>15</sup>.

Calculer les coûts marginaux d'abattement à prix constants nécessiterait normalement de faire un calcul séparé par pays et par période. Il est cependant possible d'opérer en une seule fois, en soustrayant des surplus marginaux calculés (et obtenus pour de petites variations du niveau d'abattement) les gains nets marginaux des termes de l'échange.

En d'autres termes, le coût marginal d'abattement est égal au coût marginal de charge morte, déflaté par le coût marginal des fonds publics :

$$CMA = \frac{1}{1 + CMFP} \frac{dCCM}{dA}$$

### L'établissement du compte de référence

L'utilisation d'un modèle nécessite, outre son estimation et son calibrage, c'est-à-dire la détermination des paramètres permettant de reproduire la situation initiale, l'élaboration d'un compte de référence par rapport auquel seront évalués les divers scénarios.

La définition précise du compte de référence revêt un caractère important puisque les réductions des émissions de gaz à effet de serre adoptées à Kyoto sont définies par rapport à celles de 1990. Plus le compte de référence supposera une croissance forte de ces émissions, plus ces réductions d'émission seront contraignantes. Les modèles d'équilibre général ne sont pas adaptés à la réalisation de prévisions et par suite la pratique des modélisateurs est de recourir à des prévisions élaborées par ailleurs. Il existe peu de prévisions mondiales à l'horizon 2020, dans une nomenclature énergétique et un découpage géographique adéquat. On a ainsi été conduit à retenir celles réalisées par l'EIA (EIA, 1999), qui ont, entre autres, le très grand mérite d'être établies chaque année et ce de longue date, d'être publiées et présentées à tous les utilisateurs potentiels, et de comporter ainsi un suivi et une comparaison systématique *ex post* entre prévisions et réalisations<sup>16</sup>. Elles sont utilisées par la plupart des équipes de modélisation travaillant sur ces mêmes sujets. Le compte de référence s'appuie sur les dernières prévisions disponibles au moment de l'étude, soit celles publiées en mars 1999, le modèle couvrant la période 1995-2020.

LES TABLEAUX 2 et 3 présentent les traits principaux de ce compte de référence, la croissance mondiale croîtrait de 3,3 % par an sur la période, les émis-

14. Voir Bernard (1999).

15. Le coût marginal des fonds publics s'obtient, de manière analogue au coût marginal d'abattement, par le calcul de la variation de bien-être résultant d'une petite variation des dépenses publiques à prix internationaux inchangés (ou par le calcul de la variation de bien-être nette de la variation des gains de termes de l'échange).

16. Ces prévisions sont disponibles sur le site internet de l'EIA : <http://www.eia.doe.gov/>.

TABLEAU 2

Croissance économique et consommation d'énergie dans le compte de référence			
	Taux de croissance annuel moyen, 1995-2020, en %		
	PIB	Consommation d'énergie	Émissions de carbone
France	2,2	1,3	1,1
UE11	2,4	1,2	0,9
États-Unis	2,3	1,4	1,3
Japon	1,7	0,9	0,7
Ex-Union soviétique	2,1	1,0	0,8
Pays exportateurs d'énergie	3,9	3,1	3,0
Reste du Monde	4,4	3,3	3,2
<b>Monde</b>	<b>3,3</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>

Sources : Energy Information Administration, Washington DC, et estimations des auteurs.

TABLEAU 3

Balance énergétique mondiale et émissions de carbone en 2020					
En millions de Tep pour les produits énergétiques ; millions de tonnes pour les émissions de carbone					
	Charbon	Gaz	Produits pétroliers	Électricité	Émissions de carbone
<i>France</i>					
Ménages	1	17	26	13	33
Industrie et autres secteurs	8	24	78	29	89
Électricité	5	9	2	-	13
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>50</b>	<b>106</b>	<b>42</b>	<b>135</b>
Taux de croissance 1995/2020	- 0,5 %	2,3 %	1,1 %	1,5 %	1,1 %
<i>UE11</i>					
Ménages	6	151	181	54	255
Industrie et autres secteurs	47	166	291	135	402
Électricité	98	142	56	-	249
<b>Total</b>	<b>151</b>	<b>459</b>	<b>527</b>	<b>190</b>	<b>907</b>
Taux de croissance 1995/2020	- 1,3 %	2,9 %	0,9 %	1,8 %	0,9 %
<i>États-Unis</i>					
Ménages	2	126	333	124	361
Industrie et autres secteurs	43	302	640	251	777
Électricité	531	299	4	-	795
<b>Total</b>	<b>576</b>	<b>727</b>	<b>978</b>	<b>375</b>	<b>1932</b>
Taux de croissance 1995/2020	0,8 %	1,9 %	1,9 %	1,4 %	1,3 %
<i>Japon</i>					
Ménages	0	13	72	32	68
Industrie et autres secteurs	43	12	158	82	187
Électricité	43	77	27	-	121
<b>Total</b>	<b>86</b>	<b>102</b>	<b>256</b>	<b>113</b>	<b>376</b>
Taux de croissance 1995/2020	0,7 %	2,5 %	0,5 %	1,6 %	0,7 %
<i>Ex-Union Soviétique</i>					
Ménages	24	96	32	18	116
Industrie et autres secteurs	50	275	139	83	351
Électricité	49	268	56	-	276
<b>Total</b>	<b>123</b>	<b>639</b>	<b>227</b>	<b>101</b>	<b>744</b>
Taux de croissance 1995/2020	- 1,1 %	1,7 %	0,8 %	0,9 %	0,8 %
<i>Pays exportateurs d'énergies</i>					
Ménages	0	101	176	33	213
Industrie et autres secteurs	18	87	421	76	429
Électricité	24	101	106	-	181
<b>Total</b>	<b>42</b>	<b>288</b>	<b>703</b>	<b>109</b>	<b>823</b>
Taux de croissance 1995/2020	2,9 %	3,0 %	3,1 %	3,3 %	3,0 %
<i>Reste du Monde</i>					
<b>Total</b>	<b>2 873</b>	<b>619</b>	<b>2 423</b>	<b>767</b>	<b>5 642</b>
Taux de croissance 1995/2020	3,2 %	2,9 %	3,5 %	3,6 %	3,2 %
<i>Monde</i>					
<b>Total</b>	<b>3 863</b>	<b>2 883</b>	<b>5 222</b>	<b>1 697</b>	<b>10 559</b>
Taux de croissance 1995/2020	2,4 %	2,3 %	2,2 %	2,4 %	2,2 %

sions de carbone augmentant de 2,2 % par an. Les consommations d'énergie par produits évolueraient ainsi de manière différenciée selon les pays, traduisant des spécificités nationales, même si de façon générale le compte de référence retient une pénétration du gaz dans les secteurs énergétiques des pays développés et le maintien d'un développement soutenu de la demande d'électricité.

### Le calcul des réductions d'émissions résultant des engagements pris à Kyoto

Le protocole de Kyoto, adopté en décembre 1997, a défini pour les pays dits de l'Annexe I<sup>17</sup> des engagements chiffrés, qui sont exprimés en pourcentage de réduction par rapport à l'année 1990 (année de base) pour la période cible des années 2008-2012. Les réductions effectives se déduisent de la comparaison des émissions tendanciuelles du compte de référence avec celles prévues par le protocole.

Une difficulté existe cependant qui a trait aux émissions de gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone résultant de la combustion d'énergie fossile (méthane, oxyde d'azote et substituts aux CFC) ainsi qu'aux puits de carbone (boisement). Or ces autres émissions ou ces piégeages sont très rarement représentés par les modèles. Mais des évaluations ont été effectuées par les différents pays sur leur contribution, et en particulier sur les réductions d'émissions qu'il est possible d'espérer obtenir à des coûts raisonnables. En en tenant compte, il résulte, par différence, la réduction d'émissions que le secteur énergétique doit obtenir pour atteindre les engagements fixés à Kyoto. Elle figure dans le TABLEAU 4.

On notera la présence, pour l'ex-Union soviétique, d'un crédit d'émission appelé communément *air chaud*, lequel résulte du fait que la restructuration profonde de son économie a entraîné une baisse massive de sa consommation d'énergie et par suite, de ses émissions de gaz à effet de serre, et que ceux-ci devraient rester en 2010, et même en 2020, très en dessous du niveau de 1990.

TABLEAU 4

Réduction des émissions de carbone compte tenu du protocole de Kyoto			
	Réduction des émissions définie par le protocole par rapport à 1990	Réduction des émissions énergétiques compte tenu des réductions des autres gaz à effet de serre	Réduction des émissions énergétiques par rapport au compte de référence (2010)
	En %		
France	0	+ 1,5	- 17
Union européenne (sans la France)	- 8	- 6	- 26,5
États-Unis	- 7	- 3	- 29
Japon	- 6	- 6	- 22
Ex-Union soviétique	0	0	+ 44

17. Principalement l'ensemble des pays industrialisés de l'OCDE, les anciens pays de l'Europe de l'Est et les principaux pays appartenant à l'ex-Union soviétique. Le texte du protocole de Kyoto est disponible sur le site internet <http://www.unfccc.de>.

## **S** scénarios préliminaires : détermination des courbes de taxe sur le carbone et de coût marginal d'abattement

Un élément important dans l'analyse et la compréhension des mécanismes en jeu est la détermination des courbes de taxe sur le carbone et de coûts marginaux d'abattement, pour chaque pays/région et pour chaque période. Ces courbes déterminent le montant de la taxe sur le carbone à mettre en œuvre pour atteindre, par des actions purement nationales, un objectif donné de réduction des émissions ainsi que le coût lié (en termes marginaux), et par suite fournissent des indications sur la manière dont s'effectueront les échanges de droits à polluer dans le cas de la mise en place d'un marché de permis. Ont été ainsi définis plusieurs types de scénarios préliminaires, avec un objectif connexe qui est d'examiner l'influence du mécanisme de redistribution des recettes de la taxe environnementale, soit par des « transferts forfaitaires », qui est l'hypothèse la plus souvent retenue dans les évaluations comparables, soit par réduction proportionnelle de la fiscalité indirecte, TVA pour les pays européens et taxes à la production dans les autres pays qui ne recourent pas à cet instrument fiscal<sup>18</sup>.

### **Mode de redistribution fiscale : comparaison entre transferts forfaitaires et réduction de la fiscalité indirecte existante**

Du point de vue d'efficacité économique, la réduction de la fiscalité indirecte est théoriquement préférable aux transferts forfaitaires car elle réduit le coût de distorsion de la taxation. Il est aussi important de vérifier cette proposition afin de tester la cohérence et la robustesse du modèle utilisé.

Deux scénarios de taxation nationale (c'est-à-dire sans permis) ont été réalisés, conformément aux deux modalités retenues de redistribution fiscale. Les résultats sont présentés dans le TABLEAU 5.

Ils montrent très clairement la plus grande efficacité, pour chacun des pays ou zones de l'OCDE décrits dans le modèle, et à chaque période, de la redistribution sous forme de baisse de la fiscalité indirecte. On peut ainsi considérer que la bonne politique d'internalisation des coûts d'environnement est de déformer la structure de la fiscalité existante, en aggravant celle qui porte sur les biens « polluants » et en dégageant (partiellement du moins) celle des produits « propres ».

Dans la suite de l'article, les scénarios seront tous réalisés avec redistribution des recettes de la fiscalité environnementale ou de la vente des droits à polluer sous forme de baisse générale de la fiscalité indirecte.

18. L'utilisation des éco-taxes pour abaisser les cotisations sociales est souvent préconisée dans le but de réduire le coût du travail et favoriser le plein emploi, procurant ainsi un « double dividende ». Ce mécanisme ne peut être décrit et évalué correctement qu'au moyen d'une représentation adaptée du marché du travail et surtout de ses déséquilibres, ce qu'incorporent rarement les modèles d'équilibre général dédiés à l'évaluation des politiques de long terme. La même question que celle formulée dans l'introduction se pose : pourquoi une telle politique, si elle est véritablement efficace, n'a-t-elle pas déjà été mise en œuvre, indépendamment de tout objectif ou contrainte environnementale ?

TABLEAU 5

## Protocole de Kyoto sans permis négociables

Coût de bien-être en monnaie nationale constante\* et en % de la consommation finale des ménages

	Transferts forfaitaires				Baisse de la fiscalité indirecte			
	2005	2010	2015	2020	2005	2010	2015	2020
France	- 6 964	- 18 292	- 33 063	- 53 503	- 5 538	- 15 904	- 29 645	- 49 003
<i>En % de la consommation des ménages</i>	- 0,13 %	- 0,31 %	- 0,49 %	- 0,71 %	- 0,10 %	- 0,27 %	- 0,44 %	- 0,65 %
UE11	- 10 989	- 34 112	- 48 422	- 66 080	- 8 339	- 28 646	- 41 394	- 57 094
<i>En % de la consommation des ménages</i>	- 0,32 %	- 0,89 %	- 1,12 %	- 1,35 %	- 0,25 %	- 0,75 %	- 0,95 %	- 1,16 %
États-Unis	- 14 176	- 40 291	- 54 035	- 64 825	- 12 442	- 36 552	- 49 344	- 59 402
<i>En % de la consommation des ménages</i>	- 0,27 %	- 0,66 %	- 0,80 %	- 0,89 %	- 0,23 %	- 0,60 %	- 0,73 %	- 0,81 %
Japon	- 550	- 1 408	- 2 019	- 2 826	- 443	- 1 235	- 1 809	- 2 570
<i>En % de la consommation des ménages</i>	- 0,18 %	- 0,42 %	- 0,54 %	- 0,68 %	- 0,14 %	- 0,37 %	- 0,49 %	- 0,62 %

\* Millions d'unités de compte 1990 pour tous les pays ou zones sauf le Japon (milliards de Yens 1990). Rappelons que pour l'ex-Union soviétique, les Pays exportateurs d'énergie et le Reste du Monde, les comptes sont établis en dollars de 1990.

## Détermination des courbes de taxe sur le carbone et de coût marginal d'abattement

Le TABLEAU 6 fournit pour chaque pays et chaque année les valeurs du coût marginal des fonds publics qui est un ingrédient dans le calcul du coût marginal d'abattement. Elles ont été calculées à partir du compte de référence, et non recalculées de manière systématique pour chaque scénario réalisé. L'on s'est contenté de vérifier leur stabilité, laquelle s'explique par le fait que les recettes de la fiscalité environnementale ne représentent qu'une part faible des recettes totales. Il en serait sans doute autrement avec des niveaux de réduction des émissions, et par suite des niveaux de taxe, très élevés.

TABLEAU 6

## Coût marginal des fonds publics

	1998	2000	2005	2010	2015	2020
France	0,10	0,10	0,13	0,13	0,13	0,13
UE11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14
États-Unis	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Japon	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
Ex-Union soviétique	0,23	0,22	0,22	0,25	0,23	0,23
Pays exportateurs d'énergie	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
Reste du Monde	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

Les résultats sont d'ordres de grandeur auxquels on pouvait s'attendre : élevées pour l'ex-Union soviétique, intermédiaires pour les pays Européens y compris la France et faibles pour les États-Unis et le Japon.

## Scénarios préliminaires

Le calcul des courbes de taxe sur le carbone et de coût marginal de réduction est obtenu à partir d'une série de scénarios préliminaires, pour différents niveaux de réduction des émissions de carbone. Les niveaux de réduction des émissions des scénarios testés correspondent aux valeurs retenues par le protocole de Kyoto, sans ou avec recours aux permis négociables, sous différentes configurations. L'on obtient ainsi, pour chaque pays, une fourchette de taux d'abattement suffisamment large pour représenter les courbes visées.

À ce stade, les scénarios utilisant le recours aux permis négociables n'intègrent pas les transferts monétaires correspondant au paiement, par les pays acheteurs aux pays vendeurs, de ces permis afin de gommer les effets revenus liés à ces transferts et de permettre ainsi de centrer l'analyse sur les effets de substitution liés à la taxation. Ces scénarios, « Iso-Taxes » ou « Iso-MAC », sont par ailleurs intéressants car ils représentent la situation qui aurait résulté de l'application d'une règle du jeu consistant à répartir les efforts des pays jusqu'à atteindre un même niveau de taxe sur le carbone (alternativement de coût marginal d'abattement) dans tous les pays concernés.

Outre les scénarios de taxation nationale les scénarios testés sont donc les suivants :

- « Iso-Taxe OCDE » ou égalisation des taxes sur le carbone dans la zone OCDE<sup>19</sup>, sur la base des engagements de cette zone dans le protocole de Kyoto ;
- « Iso-Taxe OCDE avec air chaud » ou égalisation des taxes sur le carbone dans la zone OCDE compte tenu des engagements des pays de l'Annexe I ;
- « Iso-MAC OCDE » ou égalisation des coûts marginaux d'abattement dans la zone OCDE, sur la base des engagements de cette zone dans le protocole de Kyoto ;
- « Iso-MAC OCDE avec air chaud » : égalisation des coûts marginaux d'abattement compte tenu des engagements des pays de l'Annexe I.

Ces scénarios sont réalisés par l'application pour chaque consommation énergétique, consommation intermédiaire et consommation finale, d'une taxe sur le carbone proportionnelle aux émissions de carbone.

## Résultats des scénarios préliminaires

Les résultats sont présentés dans le TABLEAU 7, pour les années 2005, 2010, 2015 et 2020. Figurent ainsi, pour chaque pays ou région, et chaque année, la réduction effective des émissions de carbone, la taxe sur le carbone et le coût marginal de réduction. Les courbes de taxe sur le carbone et de coût marginal d'abattement correspondantes sont représentées dans le GRAPHIQUE 3.

19. Représentée dans notre modèle par les pays européens, la France, les États-Unis et le Japon.

TABLEAU 7

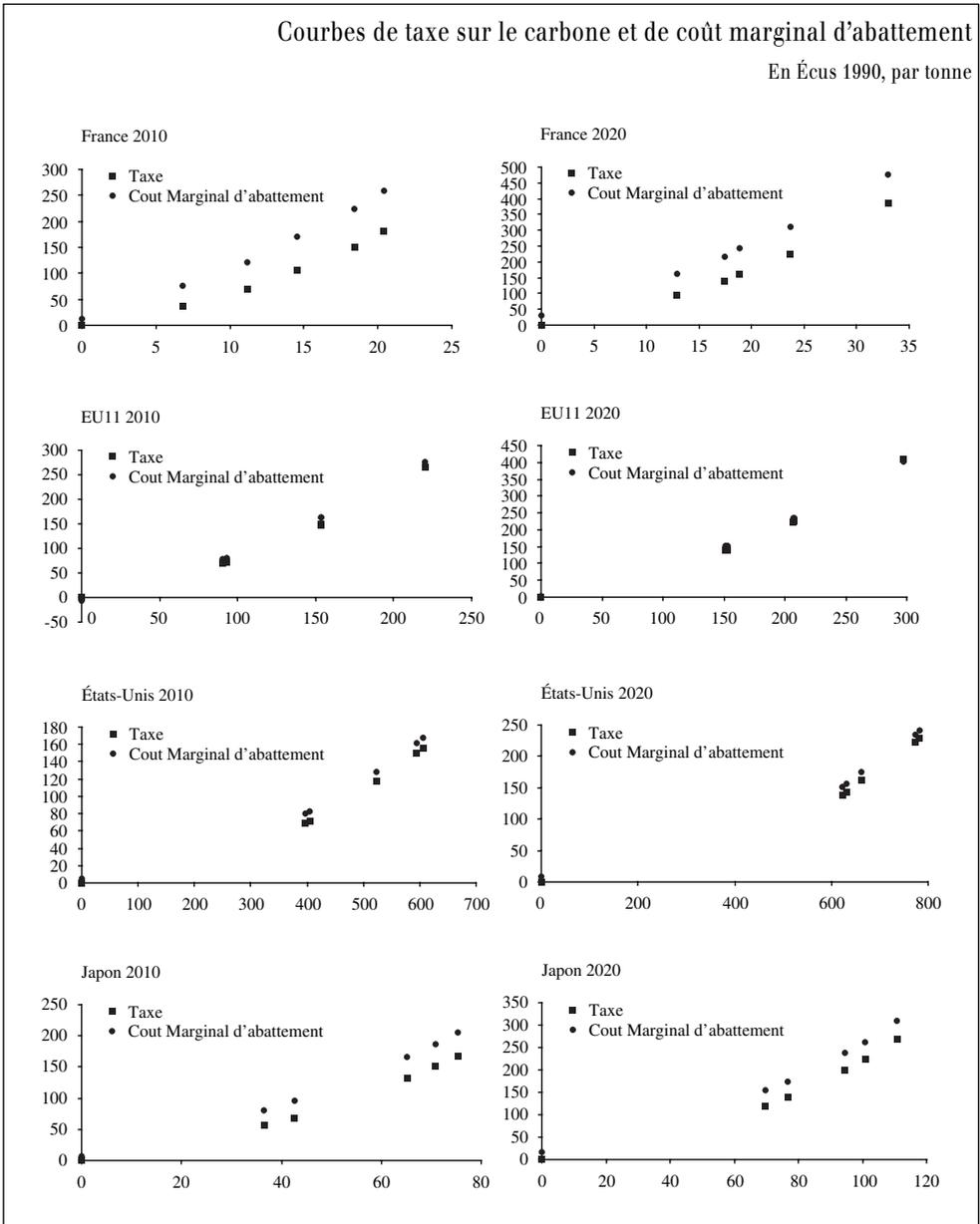
## Résultats des scénarios Iso-Taxes et Iso-CMA\*

Baisse des émissions en millions de tonnes de carbone – Coûts et taxes en Écus 1990 par tonne

	Réduction des émissions	2010 Taxe sur le carbone	Coût marginal d'abattement	Réduction des émissions	2020 Taxe sur le carbone	Coût marginal d'abattement
<b>Compte de référence</b>						
France	0	0	12	0	0	30
UE11	0	0	-6	0	0	5
États-Unis	0	0	5	0	0	8
Japon	0	0	7	0	0	17
<i>Total ou moyenne</i>	<i>0</i>	<i>-</i>	<i>nd</i>	<i>0</i>	<i>-</i>	<i>nd</i>
<b>Taxes nationales</b>						
France	20	180	259	33	385	477
UE11	220	265	276	297	408	403
États-Unis	522	117	129	663	161	175
Japon	75	168	205	111	269	309
<i>Total ou moyenne</i>	<i>838</i>	<i>-</i>	<i>177</i>	<i>1 104</i>	<i>-</i>	<i>259</i>
<b>Iso-Taxes OCDE sans Air chaud</b>						
France	18	150	224	24	223	311
UE11	154	150	164	207	223	233
États-Unis	595	150	162	773	223	235
Japon	71	150	186	101	223	263
<i>Total ou moyenne</i>	<i>838</i>	<i>-</i>	<i>166</i>	<i>1 104</i>	<i>-</i>	<i>239</i>
<b>Iso-Taxes OCDE avec Air chaud</b>						
France	11	69	122	17	138	216
UE11	90	69	78	152	138	152
États-Unis	398	69	81	622	138	152
Japon	43	69	96	77	138	175
<i>Total ou moyenne</i>	<i>542</i>	<i>-</i>	<i>82</i>	<i>868</i>	<i>-</i>	<i>155</i>
<b>Iso-CMA OCDE sans Air chaud</b>						
France	14	103	166	19	160	240
UE11	155	153	166	211	231	240
États-Unis	603	155	166	780	228	240
Japon	65	132	166	95	201	240
<i>Total ou moyenne</i>	<i>838</i>	<i>-</i>	<i>166</i>	<i>1 104</i>	<i>-</i>	<i>240</i>
<b>Iso-CMA OCDE avec Air chaud</b>						
France	8	41	82	13	88	156
UE11	94	72	82	155	142	156
États-Unis	403	71	82	629	142	156
Japon	37	57	82	71	120	156
<i>Total ou moyenne</i>	<i>542</i>	<i>-</i>	<i>82</i>	<i>868</i>	<i>-</i>	<i>156</i>

\* Coût marginal d'abattement.

GRAPHIQUE 3



Plusieurs remarques peuvent être faites à ce stade. Dans chaque pays ou région, et pour chaque période, la courbe de coût marginal est au-dessus de la courbe de la taxe sur le carbone (en particulier le coût marginal est positif à l'origine<sup>20</sup>). Ces deux courbes et leurs positions relatives restent approximativement

20. Sauf pour la zone EU11 en 2010 mais ce résultat erratique n'est pas vraiment significatif.

inchangées sur la période 2000-2020. Enfin, l'écart relatif entre ces deux courbes varie d'une zone à l'autre : c'est en France qu'il est le plus élevé, et aux États-Unis et en Europe qu'il est le plus faible, le Japon étant dans une position intermédiaire. On peut esquisser un parallèle avec l'échelle des niveaux d'émission par habitant, moins de 2 tonnes en France, autour de 3 tonnes au Japon et en Europe, plus de 5 tonnes aux États-Unis, laquelle reflète l'importance des efforts passés d'économies d'énergie ou de politiques visant le renforcement de l'indépendance énergétique tels le programme nucléaire en France<sup>21</sup>, et dans une moindre mesure le programme japonais.

Relativement aux scénarios « Iso-taxes », les équilibres « Iso-CMA » donnent une baisse des émissions plus importante pour les États-Unis, et plus faible pour les autres pays de l'OCDE, même si ces écarts sont faibles. D'autre part, le fait que le coût marginal soit systématiquement supérieur à la taxe sur le carbone a pour conséquence qu'un marché des permis basé sur les coûts marginaux donnerait un prix plus élevé qu'un marché basé sur les taxes, comme on pourra le vérifier par la suite.

Il est intéressant de comparer ces courbes de taxe sur le carbone et de coût marginal d'abattement obtenues avec le modèle GEMINI-E3/*GemWTraP* aux évaluations provenant d'autres modèles ou d'autres études<sup>22</sup>. Ceci peut se faire notamment dans le cas des États-Unis pour lesquels on dispose, outre l'étude déjà citée (EIA, 1998), des résultats obtenus avec le modèle EPPA<sup>23</sup> du MIT. Notons toutefois que ce modèle ne distingue pas entre les deux grandeurs, et le GRAPHIQUE 4, qui présente cette comparaison, retient en ce qui le concerne, la même série.

## Mise en œuvre du protocole de Kyoto sans permis négociables

Les résultats concernant les taxes et les coûts marginaux d'abattement, dans cette configuration de mise en œuvre du protocole de Kyoto, sont présentés sur le GRAPHIQUE 5, pour les années 2010 et 2020. Les taxes sur le carbone sont les plus faibles aux États-Unis et les plus élevées en Europe. Le niveau plus faible de la taxe en France, comparé à celui des autres pays européens, s'explique par le taux plus faible de réduction (en l'occurrence la stabilité par rapport à 1990) obtenu par la France dans la « bulle » européenne<sup>24</sup>. En ce qui concerne le coût marginal d'abattement, les niveaux sont peu éloignés de ceux des taxes, sauf pour la France qui atteint la valeur la plus élevée en 2020.

21. Concernant l'incidence du programme nucléaire français, on pourra se reporter à Charmant (1991) ; Charmant, Devezeaux de Lavergne & al. (1991) ; Bernard, Charmant & al. (1992) ; Vielle (1996) ; Bernard & Vielle (2000b).

22. Concernant l'ensemble des pays ou régions de l'OCDE individualisés dans le modèle, une comparaison avec la version antérieure de GEMINI-E3 et avec le modèle GREEN fait apparaître des résultats très proches (Bernard & Vielle, 1998b ; Van der Mensbrugge, 1998).

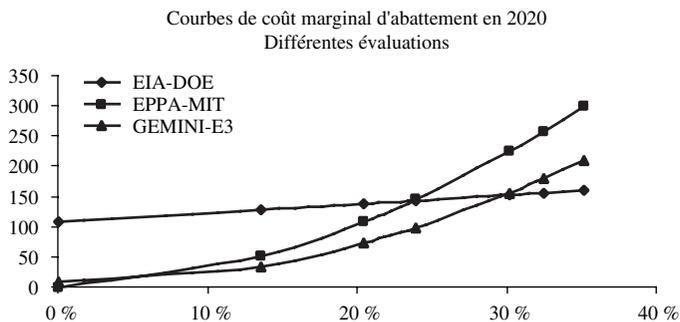
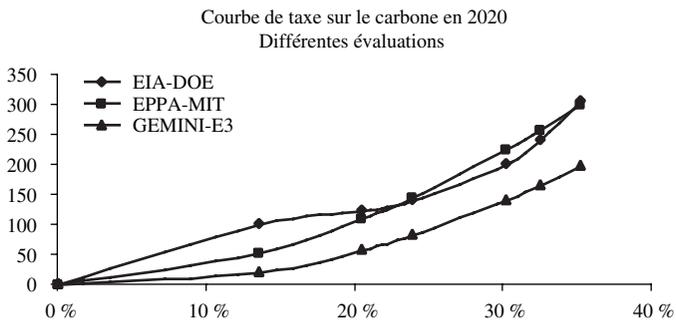
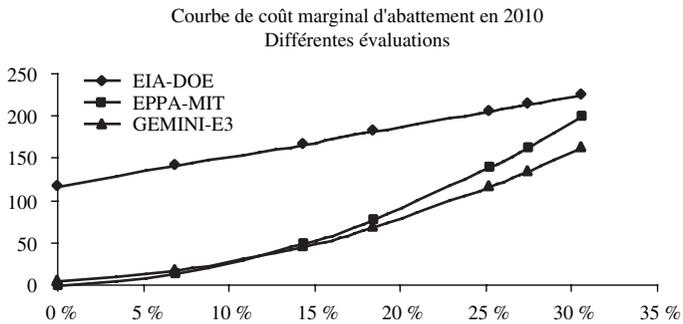
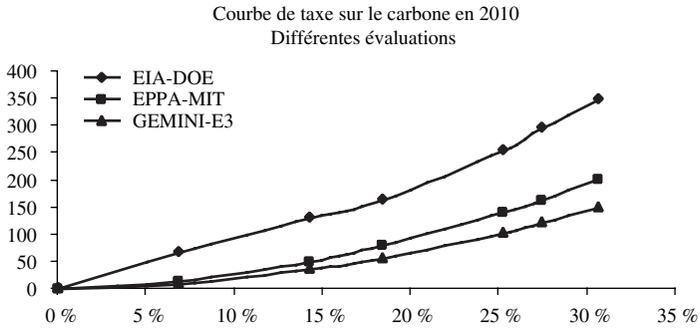
23. EPPA : Emissions Prediction and Policy Analysis (voir Yang & al., 1996).

24. Et accessoirement par une croissance économique plus faible, notamment au cours des années quatre-vingt-dix.

GRAPHIQUE 4

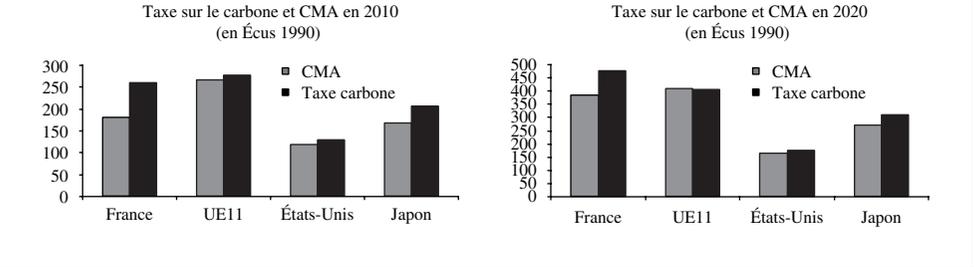
Comparaison de différentes évaluations pour les États-Unis

En dollars de 1996, par tonne de carbone



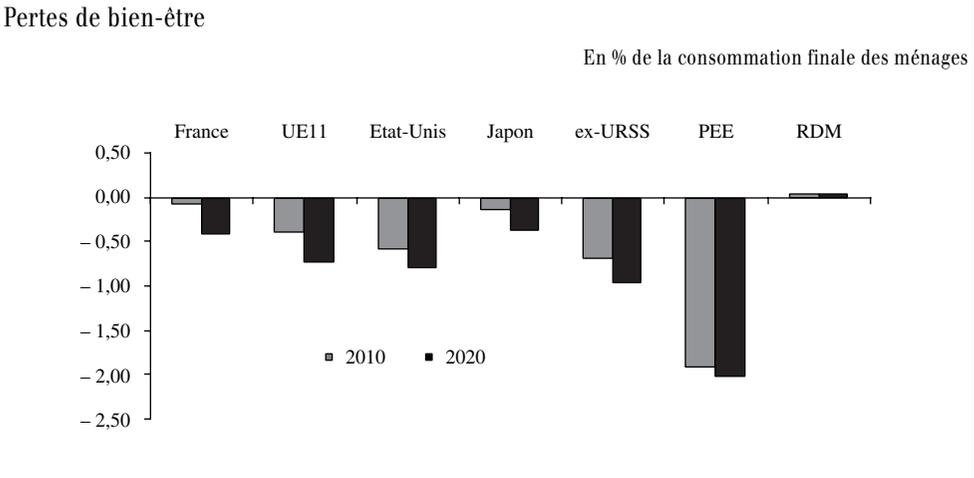
GRAPHIQUE 5

Protocole de Kyoto sans permis négociables :  
taxe sur le carbone et coût marginal d'abattement en 2010 et 2020



Les pertes de bien-être sont présentées sur le GRAPHIQUE 6 (en pourcentage de la consommation finale des ménages). Elles sont proportionnellement les plus fortes chez les pays exportateurs d'énergie, ce qui reflète la forte incidence de la modification des termes de l'échange. L'ex-Union soviétique, qui est aussi un exportateur net d'énergie, enregistre elle aussi une perte de bien-être inférieure, en valeur relative, à celle des pays exportateurs d'énergie mais supérieure à celle supportée par chacun des pays de la zone OCDE.

GRAPHIQUE 6



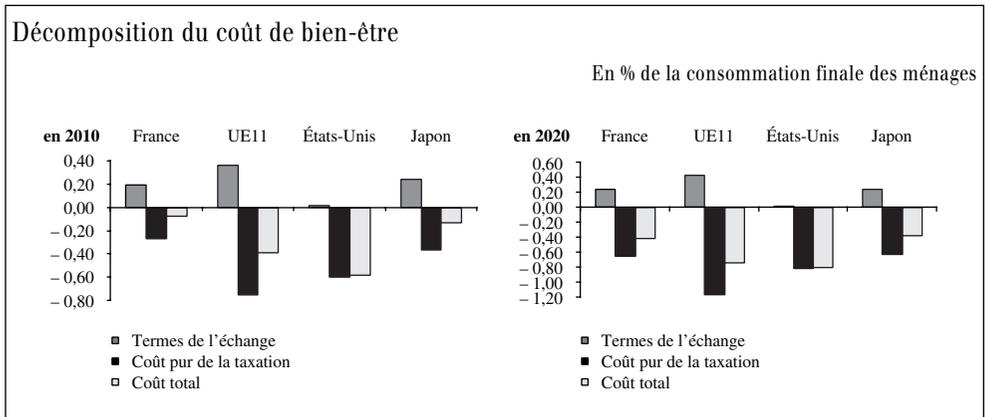
Comme le montre le TABLEAU 8, les termes de l'échange bénéficient principalement aux pays européens et au Japon, qui sont très fortement importateurs d'énergie, et pratiquement pas aux États-Unis. Dans ce scénario, les États-Unis ont la plus faible taxe sur le carbone et le plus faible coût marginal de réduction. Néanmoins, du fait qu'ils ne bénéficient pas de gains significatifs des termes de

l'échange, ils supportent le coût relatif le plus élevé de l'ensemble des pays de l'OCDE. La France et le Japon supportent les coûts relatifs les plus bas, ce qui s'explique pour le Japon par l'hypothèse de faible croissance économique retenue dans le compte de référence, et pour la France par les raisons indiquées précédemment. La décomposition du coût de bien-être est représentée dans le GRAPHIQUE 7 pour les années 2010 et 2020.

TABLEAU 8

Décomposition du coût de bien-être				
	En % de la consommation finale des ménages			
	France	UE11	États-Unis	Japon
<b>2010</b>				
Termes de l'échange	0,19	0,36	0,01	0,24
Coût pur de la taxation	- 0,27	- 0,75	- 0,60	- 0,37
Coût total	- 0,08	- 0,39	- 0,58	- 0,13
<b>2020</b>				
Termes de l'échange	0,24	0,43	0,01	0,24
Coût pur de la taxation	- 0,65	- 1,16	- 0,81	- 0,62
Coût total	- 0,42	- 0,73	- 0,80	- 0,38

GRAPHIQUE 7



## Mise en œuvre du protocole de Kyoto avec permis négociables

Les principaux résultats de ces scénarios sont présentés dans le TABLEAU 9. Outre les scénarios « Permis OCDE » et « Permis OCDE avec air chaud », a été réalisé un scénario « Permis Annexe I ». Ce dernier implique, à la différence du

TABLEAU 9

## Résultats des scénarios de permis négociables

Baisse des émissions et achats de permis, en millions de tonnes de carbone – Coûts et taxes en Écus 1990 par tonne											
2010						2020					
	Taxe sur le carbone	Baisse des émissions	Achats nets de permis	Coût marginal d'abattement	Coût de bien-être*	Taxe sur le carbone	Baisse des émissions	Achats nets de permis	Coût marginal d'abattement	Coût de bien-être*	
<b>Permis basés sur les taxes (OCDE sans Air chaud)</b>											
France	151	19	-2	228	-0,07 %	225	24	-9	316	-0,35 %	
UE11	151	155	-65	166	-0,40 %	225	209	-88	237	-0,73 %	
États-Unis	151	593	71	161	-0,54 %	225	770	107	234	-0,70 %	
Japon	151	71	-4	188	-0,12 %	225	101	-9	266	-0,35 %	
FSU		-10	0		-0,49 %		-16	0		-0,69 %	
<i>Total ou moyenne</i>		828	0	166			1 088	0	239		
<b>Permis basés sur les taxes (OCDE avec Air chaud)</b>											
France	70	11	-9	127	-0,08 %	141	18	-15	226	-0,29 %	
UE11	70	92	-128	80	-0,27 %	141	155	-142	157	-0,58 %	
États-Unis	70	403	-120	82	-0,55 %	141	628	-35	155	-0,81 %	
Japon	70	44	-32	99	-0,14 %	141	78	-32	180	-0,34 %	
FSU		-13	288		9,41 %		-22	225		11,36 %	
<i>Total ou moyenne</i>		537	0	84			857	0	159		
<b>Permis basés sur les taxes (Annexe I)</b>											
France	35	7	-14	75	-0,03 %	68	10	-23	130	-0,14 %	
UE11	35	53	-167	37	-0,15 %	68	90	-207	82	-0,34 %	
États-Unis	35	263	-260	41	-0,38 %	68	431	-231	73	-0,64 %	
Japon	35	26	-50	57	-0,09 %	68	49	-62	105	-0,23 %	
FSU		189	490		9,25 %		276	523		13,33 %	
<i>Total ou moyenne</i>		537	0	42			857	0	78		

	2010				2020					
	Taxe sur le carbone	Baisse des émissions	Achats nets de permis	Coût marginal d'abattement	Coût de bien-être*	Taxe sur le carbone	Baisse des émissions	Achats nets de permis	Coût marginal d'abattement	Coût de bien-être*
<b>Permis basés sur les CMA</b>										
<b>(OCDE sans Air chaud)</b>										
France	106	15	-6	168	-0,10 %	158	19	-14	239	-0,41 %
UE11	148	153	-67	163	-0,45 %	223	208	-89	235	-0,78 %
États-Unis	158	605	83	167	-0,50 %	235	783	120	241	-0,64 %
Japon	131	65	-10	165	-0,13 %	198	95	-16	238	-0,36 %
FSU		-10	0		-0,47 %		-15	0		-0,67 %
<i>Total ou moyenne</i>		828	0	166			1 089	0	240	
<b>Permis basés sur les CMA</b>										
<b>(OCDE avec Air chaud)</b>										
France	36	8	-13	83	-0,13 %	90	12	-19	156	-0,35 %
UE11	70	97	-123	83	-0,34 %	137	161	-137	156	-0,66 %
États-Unis	70	409	-113	83	-0,59 %	142	634	-29	156	-0,82 %
Japon	55	38	-37	83	-0,18 %	117	73	-38	156	-0,39 %
FSU		-15	286		11,47 %		-24	223		13,11 %
<i>Total ou moyenne</i>		537	0	83			856	0	156	

\* En pourcentage de la consommation finale des ménages.

précédent, que la fiscalité environnementale (directement sous forme de taxe sur le carbone, ou indirectement par l'achat de permis) s'applique aux agents économiques de l'ex-Union soviétique<sup>25</sup>. Ceci induit un effort de réduction des consommations énergétiques dans ce pays, et par suite une offre additionnelle de permis sur le marché mondial.

La principale différence par rapport aux scénarios préliminaires est constituée par les transferts financiers correspondant aux achats et aux ventes de permis. Ces transferts affectent la répartition du coût total entre nations, et sont particulièrement importants pour l'ex-Union soviétique, les ventes de permis représentant une part très importante en pourcentage du PIB.

### Permis basés sur les taxes sur le carbone

Les permis basés sur les taxes sur le carbone conduisent à des réductions d'émissions, des prix des permis et des coûts marginaux d'abattement très proches de ceux obtenus dans les scénarios préliminaires (scénarios Iso-taxe).

Dans le cas d'un marché limité à la zone OCDE, les États-Unis sont vendeurs nets, principalement vers les pays européens (environ 70 millions de tonnes en 2010 et 100 millions en 2020). Quand l'ex-Union soviétique participe au marché, sans – et *a fortiori* avec – un effort spécifique de réduction, tous les pays de la zone OCDE sont acheteurs nets.

L'accès au marché des permis de carbone n'implique pas nécessairement une réduction du coût de bien-être pour les pays participants, même s'il réduit le coût total mondial. La raison en est que les transferts de revenu associés aux échanges de permis modifient la demande internationale sur le marché des biens, et ainsi affectent les gains et pertes liés aux termes de l'échange<sup>26</sup>.

Les GRAPHIQUES 8 à 10 confirment cette analyse en représentant pour chaque scénario les trois composantes du coût : gains ou pertes des termes de l'échange, coût de la taxation et achats nets de permis.

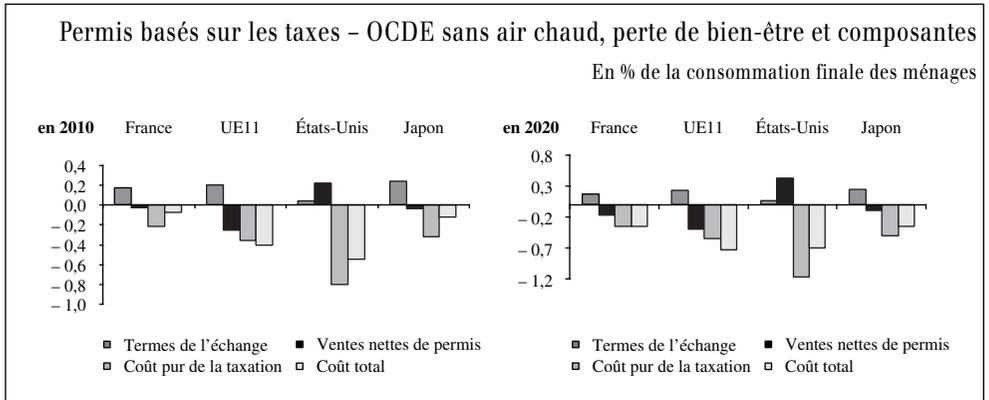
On peut noter que l'introduction d'une taxe sur le carbone en ex-Union soviétique n'est pas systématiquement avantageuse pour elle-même si le coût pur de la taxation est négatif (les subventions sur la consommation d'énergie étant éliminées). En effet, l'augmentation de l'offre de permis qui s'ensuit conduit à une baisse du prix d'équilibre (sous l'hypothèse que l'ex-Union soviétique a un comportement compétitif) et les transferts financiers liés à la vente de ces permis décroissent de façon significative. Un tel phénomène n'est bien évidemment pas une incitation pour l'ex-Union soviétique à réduire ses émissions de carbone, et encore moins à résister à la tentation de prendre avantage de sa position de quasi-monopole sur le marché des permis d'émission pour faire monter le cours, en restreignant l'offre<sup>27</sup>.

25. Cependant, l'extrême fragilité des informations statistiques sur les niveaux apparemment élevés de subventionnement des consommations énergétiques des ménages conduit à ne pas appliquer la taxe sur le carbone aux usages finals de l'énergie mais de ramener progressivement ces subventions à zéro en 2010 et d'instituer une TVA au taux de 24 %, égale au taux apparent de taxation des autres consommations finales.

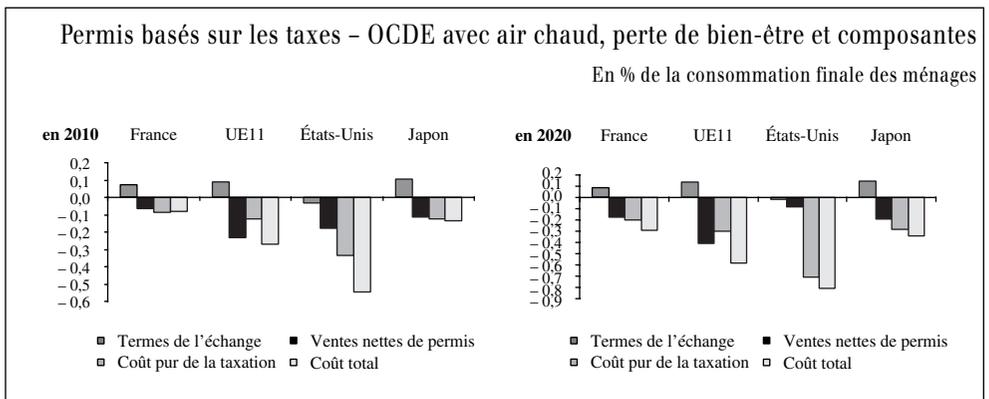
26. Un tel résultat a été démontré au niveau théorique, voir Bernard (1999).

27. Se reporter, sur cette question, à Burniaux (1998).

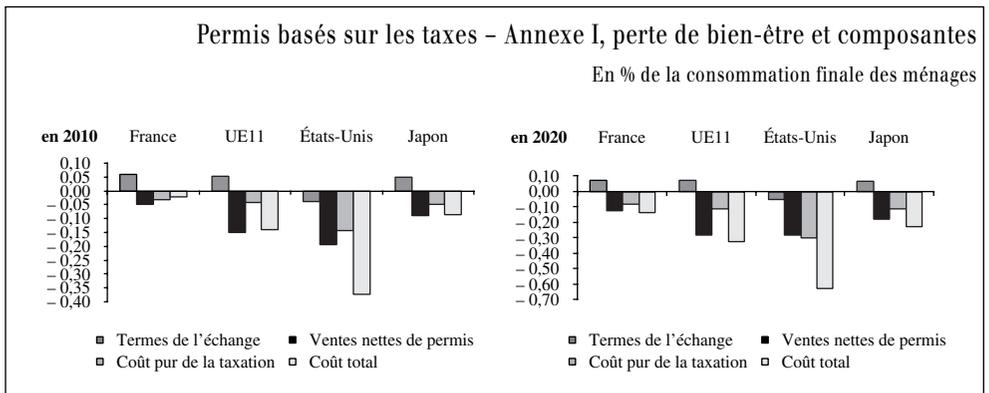
GRAPHIQUE 8



GRAPHIQUE 9



GRAPHIQUE 10



## Permis basés sur les coûts marginaux d'abattement

Les permis basés sur les coûts marginaux de réduction sont plus avantageux pour les États-Unis et moins pour les autres pays de l'OCDE dans le cas où les échanges seraient limités à cette zone. Ce résultat provient de ce que le prix des permis est alors plus élevé, ce qui avantage les pays vendeurs (en l'occurrence uniquement les États-Unis). Une comparaison détaillée de ces deux types de permis est présentée *infra*.

Un aspect important a trait à la mise en œuvre de ce marché basé sur les coûts marginaux de réduction, lequel correspond bien au comportement rationnel que l'on peut attendre des pays (lesquels n'ont pas globalement intérêt à vendre à un prix inférieur au coût d'abattement ou à acheter à un prix supérieur). L'existence d'un écart entre la taxe sur le carbone à appliquer dans chacun des pays (qui représente alors la charge totale à faire supporter aux agents économiques, entreprises et ménages, et qui varie d'un pays à l'autre) et le prix du permis sur le marché international impliquerait que seuls les gouvernements soient opérateurs sur ce marché. Concrètement, ils achèteraient ou vendraient jusqu'à ce que le coût marginal d'abattement soit égal au prix du permis sur le marché international et ajusteraient le niveau des émissions du pays – compte tenu de leurs achats ou ventes de permis – pour satisfaire leurs engagements de réduction par une taxe ou une subvention additionnelle<sup>28</sup>.

Une autre possibilité – ou plus exactement une autre façon de présenter les choses – est de considérer que les agents privés et en particulier les entreprises sont les opérateurs sur le marché des permis, le gouvernement intervenant en appliquant une taxe ou une subvention correctrice telle que déterminée précédemment.

Dans le cas présent, où les coûts marginaux d'abattement sont systématiquement plus élevés que les taxes sur le carbone, la taxe correctrice est négative, et prend donc la forme d'une subvention. Le GRAPHIQUE 11 représente pour les deux scénarios, « Permis OCDE sans air chaud » et « Permis OCDE avec air chaud », les évolutions des prix des permis négociables et des subventions dans chaque pays ou région concerné. Les subventions sont importantes, relativement aux prix du permis, principalement en France et au Japon.

## Comparaison entre les deux types de permis

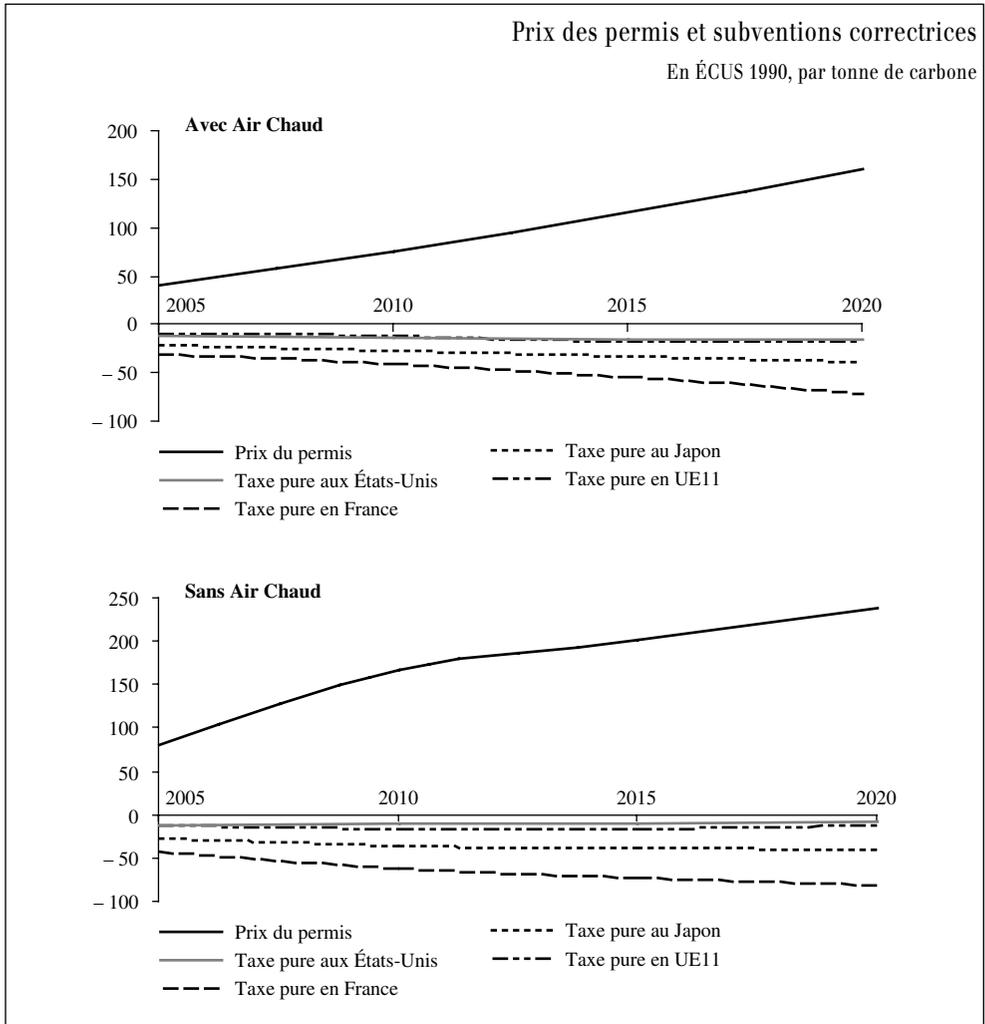
Les GRAPHIQUES 12 et 13 donnent une représentation synthétique des résultats des scénarios, principalement en ce qui concerne le coût total du protocole de Kyoto et sa répartition entre les pays ou régions.

### COÛT MONDIAL DE RÉDUCTION

Le coût mondial est le plus fort dans le scénario sans permis négociables, un résultat qui était évidemment attendu. La mise en place d'un marché de droits à polluer au sein de la zone OCDE, qu'il soit basé sur les taxes sur le carbone ou sur les coûts marginaux d'abattement, conduit à une réduction du coût de bien-être, voisine dans les deux cas et d'ampleur limitée.

28. Évidemment les deux décisions sont interdépendantes et doivent être déterminées simultanément (ou par une procédure itérative).

GRAPHIQUE 11



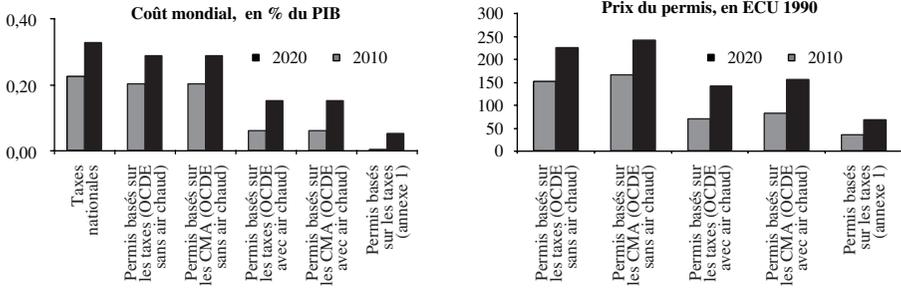
Un gain aussi faible, et le montant limité des échanges (environ 70 millions de tonnes en 2010, et 120 millions de tonnes en 2020) ne justifieraient pas la mise en œuvre d'un marché au fonctionnement certainement complexe.

La participation de l'ex-Union soviétique change considérablement l'importance prévisible des échanges du marché et les gains économiques qui en découleraient. Cependant un tel résultat ne découle pas à proprement parler de gains de l'échange. En effet, les pays industrialisés achèteraient alors à l'ex-Union soviétique des droits à polluer qu'elle serait en tout état de cause incapable d'utiliser.

Avec air chaud la baisse des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> ne serait plus que de 6 % en 2010 (comparativement au scénario de référence) au lieu de 9 % sans air chaud. Le gain en termes de bien-être provient ainsi essentiellement du moindre effort de réduction des émissions mondiales.

GRAPHIQUE 12

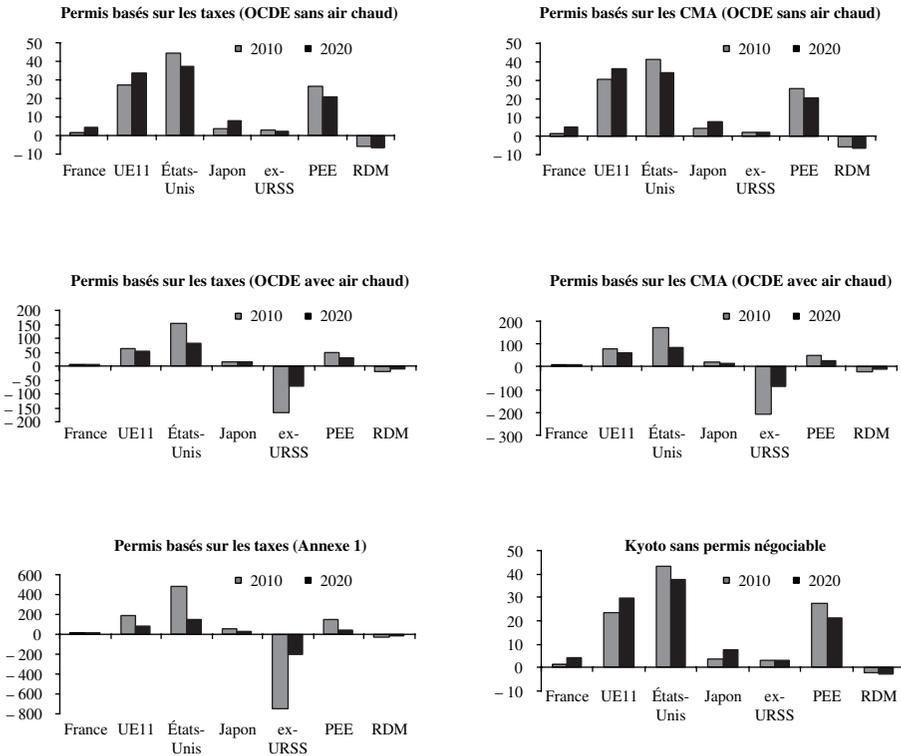
Comparaison des scénarios, coût mondial de bien-être et prix du permis



GRAPHIQUE 13

Répartition du coût mondial entre pays ou régions

En %



## RÉPARTITION DU COÛT TOTAL ENTRE PAYS

Le GRAPHIQUE 13 représente la répartition du coût total entre pays ou régions. Le total est normalisé à 100 %, avec pour conséquence que lorsque certains pays ou régions sont bénéficiaires (cas de l'ex-Union soviétique dans les scénarios où elle participe à l'échange de permis), la somme des poids entre les autres pays (parfois le poids d'un seul pays) devient supérieur à 100 %.

Tous les graphiques indiquent que le coût supporté par les pays exportateurs d'énergie serait d'un ordre de grandeur comparable à celui supporté par les États-Unis et à celui supporté par l'ensemble des pays européens. L'impact d'une politique de réduction des gaz à effet de serre sur les marchés énergétiques, et en particulier sur le prix du pétrole qui est par ailleurs très volatil, doit donc être prise en compte lors de sa mise en œuvre effective.

La comparaison des scénarios de permis négociable basés sur les taxes sur le carbone ou sur les coûts marginaux de réduction est aussi instructive. Le coût est plus faible (ou le gain est plus fort) pour les pays qui sont vendeurs nets : ceci concerne les États-Unis dans le cas où les échanges sont restreints à la zone OCDE, et l'ex-Union soviétique dans le cas où le marché de permis négociables s'établit entre l'ensemble des pays de l'Annexe I.

## Eenseignements principaux

Les enseignements principaux de cet article sont de deux ordres. Le premier a trait la question centrale posée dans la présente analyse, qui est la comparaison du système de permis négociables basés sur les taxes sur le carbone avec le système de permis basés sur les coûts marginaux d'abattement.

Les simulations réalisées et présentées dans l'article ne font pas apparaître de différences significatives en termes d'efficacité globale, confirmant les résultats obtenus au niveau théorique dans le cas où les systèmes fiscaux nationaux présentent des distorsions d'ampleur modérée, et lorsque les niveaux de réduction des émissions n'atteignent pas des niveaux trop élevés. La comparaison montre cependant des différences dans la répartition du coût de bien-être entre pays : le coût marginal d'abattement étant plus important que la taxe sur le carbone pour tous les pays concernés, les permis basés sur les coûts marginaux sont favorables aux vendeurs nets et donc défavorables aux acheteurs nets.

Dans les scénarios qui ont été examinés, les écarts entre les deux types de permis restent toutefois limités et la question peut être considérée comme étant du second ordre. Mais ceci pourrait se révéler très différent dans le cas d'une participation plus large des pays à la politique de changement climatique. Ceci concerne d'une part l'ex-Union soviétique, pour laquelle le coût marginal d'abattement est à l'évidence fortement négatif dans la situation actuelle, et dont l'alignement du coût marginal d'abattement sur celui des autres pays développés dégagerait à la fois des marges importantes de réduction des émissions à coût modéré – ce qui irait dans le sens de l'efficacité économique –, et des ressources financières supplémentaires pour le pays<sup>29</sup>.

29. L'estimation du coût marginal d'abattement dans la situation initiale donne bien des valeurs négatives pour l'ex-Union soviétique. Mais, comme il a été dit précédemment, il est difficile compte tenu de la faible fiabilité des données statistiques

Ceci concerne également les pays en développement dont la participation active au protocole de Kyoto, avec des engagements précis de réduction – voire de modération de la croissance – des émissions changerait considérablement les perspectives de la politique de changement climatique, et ne pourrait que favoriser son efficacité. Pour ces pays, la relation entre courbe de taxe sur le carbone et courbe de coût marginal de réduction est loin d'être évidente bien que certains économistes, se fondant sur l'intensité énergétique par unité de PIB, tendent à conclure à une efficacité faible et donc des possibilités de réduction des émissions à coût très bas<sup>30</sup>. Une meilleure connaissance des systèmes énergétiques de ces pays, et de la relation dans les économies concernées entre énergie et croissance, est un préalable à une bonne expertise de la question.

Le second enseignement a trait à l'évaluation du protocole de Kyoto à partir des différents scénarios examinés.

Alors même que le protocole de Kyoto implique un retournement assez profond de l'évolution de la consommation d'énergie fossile par rapport aux tendances passées, le coût macroéconomique global obtenu est très faible : environ 0,2 % du PIB mondial en 2010, et 0,3 % en 2020, et même moins si le mécanisme d'air chaud est pris en compte (mais alors le retournement est de moindre ampleur comme indiqué précédemment).

Le coût total mesuré par le modèle peut cependant être sous-estimé, en particulier parce que les coûts d'ajustement ne sont probablement pas bien, ou pas en totalité, pris en compte. Parmi ceux-ci figurent les coûts de déclassement anticipé du capital, notamment dans le secteur électrique : la substitution du gaz au charbon, très rapide, conduit à fermer des centrales qui auraient continué à fonctionner hors toute politique de changement climatique. L'étude réalisée par l'EIA et déjà évoquée (EIA, 1998), qui met en œuvre un sous-modèle énergétique détaillé couplé à un modèle macroéconomique traditionnel, plus apte que des modèles d'équilibre général à décrire les mécanismes d'ajustement de court-moyen terme, fait apparaître des résultats assez différents à l'horizon proche (2010) et à l'horizon plus lointain (2020). Sur le long terme, comme on a pu le vérifier, les résultats sont relativement voisins de ceux obtenus avec les modèles GEMINI-E3 et EPPA, alors qu'ils s'en différencient assez nettement sur le moyen terme. Il y a là un problème posé aux modélisateurs, dont une solution possible serait de recourir davantage à des fonctions de production à générations de capital<sup>31</sup>.

En ce qui concerne l'efficacité, les marchés de permis (excluant le mécanisme de l'air chaud) réduisent le coût total, mais d'un montant limité. Ceci reflète la faible taille d'un tel marché quand il est restreint aux seuls pays de l'OCDE, et

(suite de la note 29) disponibles de simuler l'effet sur cette zone d'une taxation sur le carbone (après élimination de toutes les subventions) à un taux comparable à celui des autres pays industrialisés. L'accroissement des prix serait tel que l'application d'élasticités constantes ou l'utilisation d'un modèle de demande des ménages, estimé ou calibré dans un tout autre contexte de prix, devient trop incertaine. C'est la raison pour laquelle il n'a pas été effectué de scénario de permis basé sur les coûts marginaux d'abattement, incluant l'ex-Union soviétique.

30. Cf. Nordhaus, 1999. Une telle analyse globale semble négliger deux aspects fondamentaux : d'une part, l'existence vraisemblable de « coûts fixes » énergétiques, les pays à faible niveau de vie ayant inévitablement une part de consommation énergétique plus forte que les pays à revenu élevé ; d'autre part le caractère non significatif des comparaisons de PIB par tête lorsque celui-ci est mesuré aux taux de change monétaires. Il faudrait à tout le moins prendre les PIB exprimés en parités de pouvoir d'achat.

31. La représentation du secteur électrique dans GEMINI-E3/E est de cette nature. Le recours à des fonctions de production à générations de capital devrait également permettre de mieux décrire la concurrence entre pays dans les secteurs intensifs en énergie, en éliminant l'hypothèse Armington qui est inappropriée à une telle analyse (cf. Bernard & Vielle, 2000a).

également le fait que l'allocation initiale des droits à polluer décidée à Kyoto n'est pas si éloignée d'une situation efficace (dans le sens où les taxes sur le carbone ou les coûts marginaux de réduction ne sont pas aussi différents qu'on aurait pu le penser *a priori*).

Le protocole de Kyoto est bien sûr très inefficace relativement aux autres pays ou régions car il n'intègre aucune incitation pour l'ex-Union soviétique et les pays en voie de développement à réduire le niveau ou à modérer la croissance de leurs émissions de gaz à effet de serre.

La mise en place, pour tous les pays, d'incitations à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et l'équité entre nations auraient probablement été mieux servies par une allocation de droits à polluer basée sur la population. En particulier les pays en voie de développement, avec de faibles taux d'émission par tête, auraient bénéficié de transferts provenant des pays industrialisés. Ils auraient ainsi été incités à restreindre la croissance de leur consommation d'énergie afin de bénéficier d'une source de revenus importante.

Enfin, la situation très spécifique des pays exportateurs d'énergie mérite une attention particulière. Leurs pertes à un horizon de court-moyen terme doivent être prises en considération. Sur le très long terme, elles pourraient être contrebalancées par la conservation de leurs ressources et leur revalorisation.

A. B.

M. V.

#### RÉFÉRENCES

- ABARE (1996), *The MEGABARE Model: Interim Documentation*, ABARE-Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics, Canberra.
- Armington P. (1969), « A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production », *IMF Staff Papers*, vol. 16 : 1, pp. 159-178.
- Bernard A. L. (1999), *The Pure Economics of Tradable Pollution Permits*, communication pour le congrès sur l'énergie organisé conjointement par l'Agence internationale de l'énergie, l'Energy Modeling Forum et l'International Energy Workshop, Paris, 16-18 juin.
- Bernard A. L., A. Charmant & al. (1992), *L'effet de serre : de la recherche à l'action politique*, Notes d'Information du CEA.
- Bernard A. L. & M. Vielle (1998a), « GEMINI-E3, un modèle d'équilibre général national-international économique, énergétique et environnemental », *Économie et Prévision*, n° 136, 5 : 1, 48.
- \_\_\_\_\_ (1998b), *Cost of CO<sub>2</sub> Abatement in a Regional or International Context: Discrepancies among Countries and Spill-Over Effects*, communication au 1<sup>er</sup> congrès mondial de l'Association des économistes de l'environnement et des ressources, Venise, 25-27 juin.
- \_\_\_\_\_ (1999), *Efficient Allocation of a Global Environment Cost between Countries: Tradable Permits VERSUS Taxes or Tradable Permits AND Taxes? An Appraisal with a World General Equilibrium Model*, communication pour le congrès organisé conjointement par l'Agence internationale de l'énergie, l'Energy Modeling Forum et l'International Energy Workshop, Paris, 16-18 juin.
- \_\_\_\_\_ (2000a), *Leakage and Compensative Rebate of Carbon Tax to Firms: A Comparison between Main OECD Countries with a General Equilibrium Model and Prospects for a New Approach*, communication pour le congrès organisé conjointement par l'Agence internationale de l'énergie, l'Energy Modeling Forum et l'International Energy Workshop, Stanford, 22-24 juin.

- \_\_\_\_\_ (2000b), *The French Nuclear Program: An Appraisal with respect to the Kyoto Protocol through a World, Dynamic, General Equilibrium Model*, communication au congrès international de l'Association internationale des économistes de l'énergie, Sydney, 7-10 juin.
- Bernstein P.A., W.D. Montgomery, Th.F. Rutherford & G.-F. Yang (1999), « Effects of Restrictions on International Permit Trading: the MS-MRT Model », *The Energy Journal*, numéro spécial « The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-Model Evaluation », mai.
- Boiteux M. (1956), « Sur la gestion des monopoles publics astreints à l'équilibre budgétaire », *Econometrica* 24 : 22-40.
- Bovenberg A. & L. Goulder (1996), « Optimal Environment Taxation in the Presence of Other Taxes: General-Equilibrium Analyses », *American Economic Review*, 86 (4), pp. 985-1000.
- Burniaux J.-M. (1998), *How Important Is Market Power in Achieving Kyoto? An Assessment Based on the GREEN Model*, séminaire d'experts de l'OCDE « Le changement climatique et la modélisation économique », Paris, 17-18 septembre.
- Burniaux J.-M., J.-P. Martin & al. (1992), *GREEN A Multi-sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO<sub>2</sub> Emissions: a Technical Manual*, Note de travail, n° 116, Département économique de l'OCDE.
- Charmant A. (1991), *An Assessment of the Impact of the French Nuclear Program on the Environment*, 14<sup>e</sup> conférence internationale de l'IAEE, Honolulu.
- Charmant A., J.-G. Devezeaux de Lavergne & al. (1991), « La France sans nucléaire », *Revue de l'Énergie*, n° 434, octobre.
- Diamond P.A. & J. Mirrlees (1971), « Optimal Taxation and Public Production », *American Economic Review*, 61, 8-27, pp. 261-278.
- Edmonds J.A., H.M. Pitcher, D. Barns, R. Baron & M.A. Wise (1995), « Modeling Future Greenhouse Gas Emissions: The Second Generation Model Description » dans *Modeling Global Change*, sous la direction de L.R. Klein & F.-C. Lo, Tokyo, United Nations University Press, pp. 295-340.
- Energy Information Administration (EIA) (1998), *Impacts of the Kyoto Protocol on U.S. Energy Markets and Economic Activity*, Report of the Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, Washington DC.
- \_\_\_\_\_ (1999), *International Energy Outlook*, rapport EIA/DOE 0484 (99), mars, U.S. Department of Energy, Washington DC.
- Gaskins D.W. & J.P. Weyant (1993), « Model Comparisons of the Costs of Reducing CO<sub>2</sub> Emissions », *American Economic Review*, 83 : 2, pp. 318-323.
- Geurts B.M.E., A.M. Gielen, R. Nahuis, P.J.G. Tang & H.R. Timmer (1997), *WordScan, Project Report to the National Research Program on Global Air Pollution and Climate Change*, Rapport n° 410200008, Bilthoven, The Netherlands.
- Guesnerie R. (1995), *A Contribution to the Pure Theory of Taxation*, Econometric Society Monographs, Cambridge University Press.
- Holsmark J. (1998), *From Kyoto Protocol to the Fossil Fuels Markets*, séminaire d'experts de l'OCDE, « Le changement climatique et la modélisation économique », Paris, 17-18 septembre.
- Lee H., J. Oliveira-Martins, & D. Van der Mensbrugge (1994), *The OECD GREEN Model: an Updated Overview*, Technical Paper, n° 97, OCDE, Centre de Développement.
- Manne A., R. Mendelsohn & R. Richels (1995), « MERGE: a Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies », *Energy Policy*, n° 3 (1).
- McKibbin W. & P. Wilcoxon (1998), « The Theoretical and Empirical Structure of the G-Cubed Model », à paraître dans *Economic Modelling*.
- M.I.E.S.-Mission interministérielle de l'effet de serre (2000), *Programme national de lutte contre le changement climatique*, la Documentation Française, Paris.

- Nordhaus W. & J. Boyer (2000), *Roll the Dice Again: Economic Modeling of Climate Change*, à paraître, MIT Press.
- Ramsey F.P. (1927), « A Contribution to the Theory of Taxation », *Economic Journal*, 37 : 47-61.
- Van der Mensbrugge D. (1998), *A (Preliminary) Analysis of the Kyoto Protocol Using the OECD GREEN Model*, mimeo, OCDE, Centre de Développement.
- Vielle M. (1996), *Two Economic, Energetic and Environmental Assessments of the French Nuclear Program*, International Seminar of the Canadian Nuclear Association, Fredericton, juin.
- Wyant J. & J.N. Hill (1999), « Introduction and Overview », *The Energy Journal*, numéro spécial, « The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-Model Evaluation », mai.
- Yang Z., R. Eckause, A.D. Ellerman & H.D. Jacoby (1996), *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model*, report n° 6, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

