

WORKING PAPER

10-98

**Permis d'émission de
CO₂ et lutte contre le
changement climatique**

une analyse des enjeux
macro-sectoriels en Belgique
par un modèle d'équilibre général



**Bureau
fédéral du Plan**

Analyses et prévisions économiques

Avenue des Arts 47-49
B-1000 Bruxelles
Tél.: (02)507.73.11
Fax: (02)507.73.73
E-mail: contact@plan.be
URL: <http://www.plan.be>

Thierry Bréchet
Novembre 1998



Permis d'émission de CO₂ et lutte contre le changement climatique

une analyse des enjeux
macro-sectoriels en Belgique
par un modèle d'équilibre général

Thierry Bréchet
Novembre 1998



Le Bureau fédéral du Plan

Le Bureau fédéral du Plan (BFP) est un organisme d'intérêt public.

Le BFP réalise des études sur les questions de politique économique, socio-économique et environnementale.

A cette fin, le BFP rassemble et analyse des données, explore les évolutions plausibles, identifie des alternatives, évalue les conséquences des politiques et formule des propositions.

Son expertise scientifique est mise à la disposition du gouvernement, du parlement, des interlocuteurs sociaux, ainsi que des institutions nationales et internationales.

Le BFP assure à ses travaux une large diffusion. Les résultats de ses recherches sont portés à la connaissance de la collectivité et contribuent au débat démocratique.

Internet

URL: <http://www.plan.be>

E-mail: contact@plan.be

Publications

Publications récurrentes:

Les perspectives économiques

Le budget économique

Le "Short Term Update"

Planning Papers (les derniers numéros)

81 *Le vieillissement démographique - De l'analyse des évolutions de population au risque de conclusions hâtives*

M. Lambrecht - Novembre 1997

82 *De pensioenhervorming - Een nieuwe generatie en een nieuw contract*

M - J. Festjens - Novembre 1997

83 *Perspectives financières de la Sécurité sociale à l'horizon 2050*

N. Fasquelle, S. Weemaes - Novembre 1997

84 *Les priorités d'Essen en matière d'emploi*

F. Bossier, I. Lebrun, S. Mertens, C. Streel, P. Van Brusselen - Janvier 1998

Working Papers (les derniers numéros)

8/98 *An Evaluation of Fiscal Measures for Energy Products in the European Union - Results from the HERMES - Link System*

F. Bossier, L. Lemiale*, S. Mertens, E. Meyermans, P. Van Brusselen, P. Zagamé* - October 1998

9/98 *Verschillen tussen ondernemingen in groei van toegevoegde waarde en tewerkstelling in België - De rol van innovatie en groep-lidmaatschap*

Bart Van den Cruyce - December 1998

Monographie

Book

Reproduction autorisée, sauf à des fins commerciales, moyennant mention de la source.

Editeur responsable:

Henri Bogaert

Dépôt légal: D/1998/7433/23

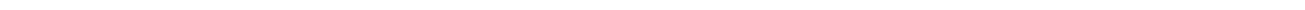




Table des matières

I	Introduction	1
II	Les permis négociables comme instrument de réduction des émissions de gaz à effet de serre	3
	A. Principes d'un marché de permis d'émission négociables	3
	B. Applicabilité à la lutte contre le changement climatique	4
	C. Avantages et limites par rapport à une taxe sur les énergies fossiles	7
III	Description du modèle SPOT-E3 et modélisation des permis négociables	9
	A. SPOT-E3 : un modèle d'équilibre général pour l'économie belge	9
	B. Modélisation d'un marché de permis négociables	13
	C. Avantages et limites du modèle SPOT-E3	15
IV	Modalités et impacts d'un marché de permis négociables sur les émissions de dioxyde de carbone	19
	A. Dotation uniforme et dotations alternatives	20
	B. L'influence d'un marché international de permis négociables	27
	C. Combiner permis négociables et mesures fiscales	31
	D. Permis négociables et mesures non fiscales	37
V	Conclusion	45
VI	Annexe : la résolution du modèle	49
VII	Références bibliographiques	51



Introduction

Ce Working Paper présente une analyse technique des impacts macro-sectoriels d'un marché de permis négociables destiné à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Cette analyse est entreprise à l'aide d'un modèle d'équilibre général appliqué de l'économie belge : ce modèle, encore partiellement exploratoire, permet d'analyser de manière rigoureuse et cohérente l'influence d'instruments fiscaux, non fiscaux ou de permis d'émission sur les comportements énergétiques de moyen-long terme avec une mise en perspective macroéconomique et sectorielle.

L'éventualité d'un recours aux permis d'émission négociables provient de l'adoption, en décembre 1997, du Protocole de Kyoto (United Nations, 1997). Depuis lors, la problématique du changement climatique fait l'objet d'un regain d'intérêt flagrant : ce phénomène résulte du fait que le protocole énonce des objectifs juridiquement contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les pays industrialisés (pays de l'Annexe 1). Sur base du protocole, ces pays se sont engagés à réduire collectivement leurs émissions de 5,2 % par rapport à 1990 sur la période 2008-2012. Cet objectif est modulé selon les pays ; il est notamment de 8 % pour l'Union Européenne et de 7 % pour les États Unis. La forte répercussion du protocole dans les milieux politiques résulte sans doute tout autant de ces engagements contraignants que de la complexité des concepts et instruments de politique économique qui y sont évoqués. Notamment, fruit d'un long processus de négociations internationales, le protocole ouvre la voie à de nombreuses options de coopération entre partenaires. Trois mécanismes fondamentaux vont dans ce sens : le commerce d'émission (*emission trading*), la mise en oeuvre conjointe (*joint implementation*) et le mécanisme de développement propre (*clean development mechanism*). Dans ce contexte, les pays industrialisés auraient la possibilité d'acheter et de vendre des permis d'émission entre eux et de recevoir des crédits d'émission en contrepartie du financement de projets réducteurs d'émission dans les pays en développement. Les modalités concrètes de mise en place de ces trois mécanismes restent cependant à définir, ainsi que le rôle dévolu aux pays en développement.

Le Protocole se contente d'évoquer la possibilité de recourir aux permis d'émission comme instrument de régulation des émissions à l'échelon international : ceux-ci ne seront pas nécessairement utilisés et, le cas échéant, les modalités pratiques d'un tel dispositif demeurent inconnues. La présente étude procède donc à une analyse essentiellement technique des permis d'émission négociables sans préjuger du type d'instrument de politique économique qui sera adopté en Belgique et dans l'Union Européenne en vue de juguler les émissions de gaz à effet de serre.

Fournir une évaluation quantitative des effets de l'instauration d'un marché de permis d'émission négociables en Belgique requiert d'une part une connaissance à la fois théorique et pratique de l'instrument, d'autre part l'utilisation d'un outil de modélisation appliquée. Cette étude a pour objectif de fournir une évaluation pour différents scénarios de mise en place d'un marché de permis négociables en Belgique. Abondante sur ces deux points, y compris en matière de changement climatique, la littérature montre que les permis négociables offrent des avantages indéniables à côté de limites assez fortes. Les grands principes d'un tel système feront donc l'objet d'une analyse préliminaire de manière à inspirer les simulations de politique économique destinées à mettre en évidence les mécanismes et à quantifier les impacts de différents scénarios. Cette étude est organisée de la manière suivante.

Une première partie présente les grands principes d'un marché de permis d'émission négociables et discute leur applicabilité à la problématique du changement climatique. Notamment, les conditions imposées par la théorie économique pour qu'un marché de permis fonctionne de manière optimale sont confrontées aux caractéristiques de cette problématique.

Un modèle d'équilibre général de l'économie belge SPOT-E3 (*Sustainable Policy Tool for Economy-Energy-Environment*) a été élaboré afin de traiter spécifiquement des questions relatives aux interactions entre économie, énergie et environnement sur le moyen-long terme. Ce nouveau modèle permet de simuler les effets de l'instauration d'un marché de permis négociables et de combiner cet instrument avec d'autres mesures de politique économique destinées à endiguer les émissions de gaz à effet de serre en Belgique. Son avantage principal est qu'il permet d'évaluer de manière parfaitement intégrée permis, mesures fiscales et non fiscales. La deuxième partie expose les grandes caractéristiques théoriques de ce modèle, ses modalités d'application et sa complémentarité par rapport au modèle macroéconométrique du Bureau fédéral du Plan, le modèle HERMÈS.

À l'aune des propriétés mises en évidence dans la première partie et en utilisant le modèle SPOT-E3, plusieurs modalités d'instauration d'un marché de permis d'émission négociables sont testées dans la troisième partie. La délicate question des dotations initiales de permis est abordée en évaluant la sensibilité des impacts macroéconomiques et sectoriels à différentes configurations. La sensibilité de l'économie belge à l'instauration d'un marché international est évaluée à l'aide d'un balayage sur le prix du permis international et les variations de compétitivité. La combinaison des permis avec des stratégies de redéploiement fiscal est ensuite envisagée dans une perspective de complémentarité des instruments ; à ce titre, l'éventualité d'un double dividende est examinée (amélioration conjointe de l'environnement et de l'emploi). Enfin, l'influence exercée par l'imposition de quotas d'émission sur la diffusion des nouvelles technologies est utilisée pour combiner, de manière endogène dans le modèle, exploitation des gisements d'économie d'énergie et permis négociables. Ces différents exercices, relativement techniques à certains égards, permettront de baliser le champ d'investigation ô combien vaste qu'ouvrent les permis négociables dans l'élaboration des politiques de lutte contre le changement climatique ¹.

1. Les travaux exposés dans ce Working Paper ont largement bénéficié des commentaires éclairés de Michel Englert, Sophie Mertens et Thomas Bernheim (Bureau fédéral du Plan), ainsi que de Paul Zagamé (Professeur à l'Université de Paris I) et d'Olivier Beaumais (Professeur à l'Université de Metz) pour les aspects modélisation. Bien sûr, les erreurs éventuelles relèvent de ma seule responsabilité.



Les permis négociables comme instrument de réduction des émissions de gaz à effet de serre

A. Principes d'un marché de permis d'émission négociables

L'idée de base d'un système de permis négociables est simple : au lieu de fixer des normes ou d'introduire une taxe, l'État attribue gratuitement ou met en vente des "permis à polluer" pour une quantité correspondant au niveau maximum de pollution acceptable. Ces permis peuvent ensuite être achetés et vendus entre les acteurs. Ainsi, plutôt que de réduire ses émissions, une entreprise peut préférer acheter des permis d'émission aux entreprises dont le coût de réduction est plus faible. En faisant cela, elle réduit le coût global de réduction des émissions imposée par l'offre de permis décidée par l'État. Sous des conditions de marché concurrentiel, ce système aboutit à la détermination d'un prix du permis d'émission égal au coût marginal de réduction des émissions. L'échange de permis entre les acteurs assure la minimisation du coût global de dépollution.

De nombreuses expériences de marchés de permis négociables ont d'ores et déjà été menées sur différents types de problématiques environnementales, mais essentiellement aux États Unis sous l'égide du *Clean Air Act* (voir OCDE (1994) pour une présentation). Ces expériences ont permis de mettre en évidence les conditions sous lesquelles un marché de permis négociables peut correctement fonctionner et remplir son rôle. Barde (1992) en sélectionne dix :

- Les coûts marginaux de réduction des émissions doivent varier entre les différents pollueurs ; plus larges sont ces différences, plus grand est le potentiel d'économie réalisable au moyen des échanges et plus forte est l'incitation à l'échange, donc plus actif est le marché ;
- Le nombre de pollueurs doit être assez grand pour la création d'un marché actif ;
- De réelles possibilités de réduction des émissions doivent exister : ce potentiel permet l'émergence de "pollueurs efficaces", vendeurs de permis ;
- Moins l'impact des polluants est localisé et plus il est indépendant de la situation géographique des sources de pollution, plus les transactions sont simplifiées ;
- L'impact des pollutions doit être le plus possible indépendant des périodes d'émission ;
- Les objectifs, c'est-à-dire l'enveloppe globale de pollution, doivent être clairement définis ;

- L'allocation initiale des permis doit être déterminée selon des critères explicites, par exemple au *prorata* des émissions passées, et fixée en terme de quantités et non de taux ;
- Les échanges doivent porter sur un seul type de polluant ;
- Les systèmes de permis négociables doivent être "intégrés" dans les politiques de lutte contre la pollution aussi étroitement et aussi en amont que possible ;
- Les règles de fonctionnement des marché de permis négociables doivent être simples et transparentes.

B. Applicabilité à la lutte contre le changement climatique

Les attraits du système de permis négociables font que la question de l'applicabilité à la problématique du changement climatique a été largement explorée dans la littérature : voir Tietenberg (1990), Chichilnisky et Heal (1995), Adams (1997) notamment¹. Une manière rapide de traiter la question est de regarder, parmi les conditions de fonctionnement présentées ci-dessus, quelles sont celles susceptibles d'être vérifiées dans la réalité et pour la problématique de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les gaz à effet de serre (GES) sont émis par un nombre important de sources individuelles et une grande variété de procédés de production (choix technologiques, intensités énergétiques...). Il en résulte une grande diversité de coûts marginaux de réduction des émissions, non seulement entre les pays mais également entre les différents types d'entreprises et de secteurs d'activité. Des échanges entre les pays ou les entreprises devraient donc limiter le coût de la réduction d'émission. Le nombre d'acteurs, qui doit être suffisant pour animer un marché concurrentiel, ne soulève pas de difficultés dans le cas d'un marché international ; tel n'est cependant pas nécessairement le cas dans l'hypothèse d'un marché national belge où de gros pollueurs, peu nombreux, seraient susceptibles d'influencer le marché. Dans la perspective d'un marché international, on peut également se poser la question de savoir qui doit intervenir sur le marché : l'État ou l'entreprise individuelle ? Des échanges internationaux entre agents privés risquent de devenir d'une extrême complexité et exigeraient, de toutes manières, une régulation par les autorités publiques. Il conviendrait donc de prévoir un système d'échanges sur le plan national (entre émetteurs situés sur le territoire national) et sur le plan international (entre pays par l'entremise d'une institution internationale). En général, pour des raisons de lourdeur administrative essentiellement, on considère peu judicieux d'inclure les ménages au sein d'un mécanisme de permis négociables (*cf. infra*).

De réelles possibilités de réduction de pollution doivent exister : c'est le cas avec les GES. Pour le dioxyde de carbone, directement attaché au contenu en carbone des énergies consommées, c'est la réduction de consommation d'énergie qui est en jeu ; pour le protoxyde d'azote et le méthane, des procédés de production alternatifs peuvent également permettre de réduire les émissions.

1. Matsuo (1998) analyse plus précisément le rôle des permis négociables au sein du Protocole de Kyoto. Pour une introduction à l'analyse économique du changement climatique, voir par exemple Nordhaus (1991), Cline (1992), Dornbush et Poterba (1992), Schelling (1992), Hope *et al.* (1993), OECD (1995).

L'impact des polluants doit être indépendant des sources, ce qui est par excellence le cas des GES à l'origine d'une pollution globale. Ce critère suggère toutefois qu'un système planétaire de permis négociables serait requis, ce qui soulève les difficultés que l'on sait en matière de négociation internationale (voir les aboutissants du sommet de Kyoto à l'échelon de l'Union européenne). Une approche graduelle, limitée au départ à un noyau de pays puis élargie progressivement, serait sans doute plus facilement envisageable.

Autre condition parfaitement remplie, l'impact des polluants doit être indépendant des périodes d'émission, ce qui est le cas puisque les GES exercent leur influence sur l'effet de serre pendant une période allant de 10 ans (N_2O) à plus de 100 ans (CO_2). Le besoin d'objectifs clairement définis offre deux interprétations possibles. D'une part, le Protocole de Toronto sur le changement climatique avait bien fixé comme objectif mondial la réduction des émissions de CO_2 de 20 % en 2005 par rapport au niveau de 1988 mais d'un autre côté, depuis, la Convention Cadre sur le Changement Climatique, signée à Rio en 1992, ne fixait quant à elle aucun objectif quantitativement précis. Le besoin d'objectifs précis et contraignants, exprimé dès la première Conférence des Parties à Berlin en 1995, traduit bien ce manque en matière de politiques nationales contre le changement climatique ; ce point rejoint la difficulté d'établir un objectif de limitation des émissions qui permette d'écartier tous les risques associés aux changements climatiques. Le Protocole de Kyoto a marqué une avancée importante à cet égard en définissant des objectifs quantitativement contraignants pour les pays industrialisés (pays de l'Annexe 1), même si l'ampleur des réductions d'émission prévues demeure insuffisante pour éradiquer tout risque de changement climatique (voir Bolin (1998) à cet égard).

Avec la question de la dotation initiale de permis entre les acteurs du marché, c'est la principale difficulté du système qui est abordée, à l'instar de tout système de quota. De nombreuses pistes ont été explorées dans le cas d'un marché instauré à l'échelon international : en fonction du PIB, en fonction des niveaux d'émissions antérieurs ou actuels (*grandfathering*), en fonction des responsabilités passées, en fonction de critères démographiques et économiques voire de critères égalitaires qui tenteraient de prendre en considération la superficie des pays, leur régime climatique, etc... La question de l'allocation des quotas entre les pays prend toute son ampleur lorsqu'on la resitue dans le cadre des négociations internationales et des rapports de force existant entre les pays industrialisés et les pays en voie de développement. Avec l'adoption du Protocole de Kyoto, cette question est résolue en ce qui concerne les pays industrialisés.

Le permis doit porter sur un polluant bien déterminé : on songe alors immédiatement au CO_2 en tant que principal gaz responsable de l'effet de serre, mais l'idée que le permis porte également sur d'autres gaz (exprimés alors en terme d'équivalent- CO_2 par utilisation de leur *potentiel de réchauffement global*) ne soulève pas de difficultés particulières, d'autant qu'un monitoring multi-gaz est appelé à être instauré de manière à assurer le contrôle des engagements pris à Kyoto.

L'intégration d'un marché de permis négociables au sein de l'arsenal des mesures de politique économique existant se heurte aux obstacles traditionnels liés à l'élaboration d'une stratégie cohérente de la gestion de l'environnement et à la culture économique des pays considérés. Un tel système devrait faire partie intégrante des politiques énergétiques, tant du point de vue des politiques réglementaires que fiscales.

Enfin, la transparence des règles se heurte à nombre de difficultés déjà évoquées : les plus rédhibitoires concernent la définition de l'autorité de contrôle pour l'allocation des permis et leurs transactions, ce qui renvoie à la dimension du marché et à son organisation.

Malgré leurs avantages, les permis négociables soulèvent donc un certain nombre de difficultés pratiques dans le cadre d'une stratégie de lutte contre le changement climatique. Même si les pays européens sont en général peu enclins à solliciter cet instrument, celui-ci offre cependant des qualités qu'il ne faut pas négliger. L'articulation des permis avec des actions de *joint implementation* ouvre par exemple des perspectives qui peuvent s'avérer fructueuses dans la recherche d'accords internationaux. La plupart des analyses se focalisent cependant sur les impacts des permis en équilibre partiel ; peu offrent un éclairage sur les répercussions macroéconomiques d'un tel système et les opportunités d'intégration au sein d'une stratégie globale de lutte contre le changement climatique. Une telle évaluation est possible dans un cadre d'équilibre général de second rang prenant en considération les principales distorsions liées à la fiscalité en vigueur. Ce sont ces deux raisons qui ont amené à incorporer un marché de permis négociables dans le modèle SPOT et à en tester les impacts sur l'économie belge.

C. Avantages et limites par rapport à une taxe sur les énergies fossiles

Les permis présentent plusieurs avantages du point de vue économique et environnemental. En premier lieu, la pollution maximale tolérée est fixée *a priori*, et elle est respectée quelles que soient les conditions macroéconomiques. L'instrument fonctionnant suivant une logique de marché, le prix du permis s'ajuste automatiquement à toute modification des conditions de demande ou d'offre. Par exemple, l'apparition d'un progrès technologique économisant l'énergie provoquera une baisse du prix du permis d'émission, reflétant le fait que le quota d'émission global est respecté à un moindre coût économique. Les pouvoirs publics ont la possibilité d'intervenir sur le marché en achetant, en vendant ou en thésaurisant des permis. Le système assure que la réduction de pollution est réalisée à coût minimal, non seulement à l'échelon global mais aussi à celui de chaque pollueur. L'inconvénient principal d'un système de permis négociables consiste en la complexité de son organisation : traitement et surveillance des transactions sont nécessaires, ainsi qu'une réglementation adéquate permettant au marché de s'animer. Chichilnisky et Heal (1995) estiment que les coûts budgétaires peuvent ne pas être négligeables, d'une part en raison du coût fixe lié à la mise en place du marché, d'autre part en raison des coûts variables fonctions du volume et du type de transactions opérées (voir à ce sujet l'analyse économétrique de Kerr et Maré, 1997). Le contrôle du respect des engagements peut également être complexe à mettre en oeuvre (plus ou moins selon la nature du permis) et coûteux ; à noter que les procédures de contrôle sont d'ores et déjà en place en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre des Nations Unies (inventaires nationaux).

Une comparaison systématique des avantages respectifs entre permis et taxe est effectuée par Heister, Michaelis et Mohr (1992) sur base d'un ensemble de dix-sept critères génériques. On retrouve évidemment certains des avantages cités ci-dessus, notamment l'efficacité écologique des permis par rapport aux taxes et leur moindre coût économique. D'autres critères sont toutefois considérés, comme l'information préalable sur les fonctions de coûts, pas nécessaire dans le cas des permis. Heister *et al.* (1992) estiment que la prédictibilité des impacts macroéconomiques des deux instruments n'est pas la même : alors que les impacts d'une taxe peuvent être prévus avec une certaine acuité, il n'en est pas de même pour les permis dont le prix est inconnu *a priori*. Cette idée traduit le manque d'évaluations macroéconomiques des systèmes de permis négociables, outil microéconomique par excellence. Par contre, le permis offre une certitude sur la sphère environnementale, ce qui signifie qu'il transfère une partie de l'incertitude de cette dernière vers la sphère économique ; la taxe procède plutôt de la démarche inverse. Les deux instruments offrent enfin une incitation différente à l'innovation technologique car le vecteur par lequel cette incitation transite n'est pas le même : l'imposition de quotas fournit un signal en terme de quantité non ambigu pour l'entreprise alors que le signal sur le prix nécessite que l'entreprise ait conscience de sa vulnérabilité (alourdissement des coûts) et de sa capacité à éluder la taxe (possibilités de réduction des consommations d'énergie). Enfin, il faut souligner le fait que l'inflation lamine le pouvoir incitatif d'une taxe *ad quantum* ; cet effet peut jouer de manière très importante à long terme et une réévaluation épisodique du niveau de la taxe est alors nécessaire. Dans un marché de permis négociables, l'inflation a pour effet d'accroître automatiquement le prix du permis de manière à respecter le quota d'émission. Cette double propriété d'endogénéité du prix du permis par rapport au contexte macroéconomique et

d'exogénéité des quotas d'émission permet de concevoir un certain échelonnement de l'effort de réduction des émissions dans le temps de manière à minimiser les coûts d'adaptation du système économique (à l'instar d'une taxe graduelle).



Description du modèle SPOT-E3 et modélisation des permis négociables

A. SPOT-E3 : un modèle d'équilibre général pour l'économie belge

Le modèle SPOT-E3 (*Sustainable Policy Tool*) est un modèle d'équilibre général statique sectoriel spécifiquement développé pour traiter des questions relatives aux interactions entre énergie, économie et environnement (E3). Autour d'une structure théorique de base relativement standard et constituant le noyau du modèle, SPOT-E3 présente plusieurs caractéristiques particulières qui lui permettent de rendre compte des interactions entre les politiques énergétiques et le système fiscal en vigueur en évaluant les impacts de politiques alternatives sur l'activité économique et les prix.

Le recours à un modèle d'équilibre général se justifie par un double souci :

- évaluer les effets des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre sur un horizon plus long que celui couvert par les modèles économétriques usuels ;
- bénéficier d'un cadre théorique alternatif au cadre néokeynésien qui permette, notamment, la modélisation de mécanismes explicites d'optimisation microéconomique et respecte certaines contraintes de long terme.

L'horizon du modèle SPOT-E3 est défini à la fois par la forme des spécifications théoriques (formes fonctionnelles et règle de bouclage), les hypothèses de flexibilité des variables de prix et de quantités ainsi que par la valeur des coefficients et paramètres (élasticités de long terme). Par construction, le modèle représente les impacts stabilisés d'un choc structurel sur un horizon de 10 à 15 ans. Le fait que les modèles d'équilibre général s'appuient sur des comportements explicites d'optimisation renforce leurs fondements théoriques par rapport aux modèles macroéconométriques ; cela autorise également le développement dans un cadre théorique parfaitement cohérent de certains modèles spécifiques (par exemple le marché de permis négociables). Enfin, l'équilibre général impose certaines contraintes qui confèrent au modèle une spécificité de long terme particulièrement adaptée aux problématiques environnementales, par opposition aux modèles économétriques davantage tournés vers les politiques de stabilisation macroéconomique (pour une introduction sur les modèles d'équilibre général et leur utilisation dans l'évaluation des mesures de politique économique, voir Borgès, 1986).

Le modèle distingue cinq secteurs productifs, un secteur public, deux consommateurs privés et trois zones géographiques représentant le reste du monde (ces caractéristiques sont présentées dans l'encadré page suivante) ¹.

Pour chaque secteur productif, une entreprise représentative est supposée maximiser son profit sous contrainte de sa fonction de production. Les marchés fonctionnent en concurrence parfaite. Les choix productifs de l'entreprise sont modélisés par l'emboîtement de fonctions CES (*constant elasticity of substitution*) pour cinq facteurs de production : le capital productif, les consommations intermédiaires d'énergie, les consommations intermédiaires non énergétiques, le travail bas salaires et les autres formes de travail. L'investissement productif résulte de l'accumulation du capital. Les consommations intermédiaires d'énergie sont éclatées, par l'entremise de fonctions translog, en cinq produits énergétiques (charbon, coke, gaz naturel, produits pétroliers et électricité). Le marché du travail est segmenté. Les deux formes de travail sont distinguées sur base du niveau de salaire : les travailleurs à bas salaires correspondent, dans cette version du modèle, aux salariés percevant une rémunération inférieure ou égale au revenu mensuel moyen minimum garanti inter-professionnel (R.M.M.M.G). Pour l'année 1994, ceux-ci représentent un peu plus de 12 % de l'emploi salarié temps plein en Belgique et sont essentiellement concentrés dans le secteur des services marchands (Bréchet, 1997).

Aux deux types d'emploi correspondent deux types de ménages. Chaque ménage opère un arbitrage entre consommation et loisir de manière à maximiser son utilité. Les structures de revenu et de consommation, les taux d'épargne et les élasticités de substitution sont distinctes pour chacun des deux ménages. La fiscalité directe est modélisée de manière à tenir compte de la progressivité de l'impôt. La consommation totale de chaque ménage est désagrégée, par recours à des systèmes AIDS (*Almost Ideal Demand System*), en quatorze catégories de biens et services. Les consommations d'énergie pour le chauffage et l'éclairage sont ensuite décomposées en quatre produits énergétiques avec des systèmes translog (charbon, gaz, produits pétroliers et électricité).

La modélisation des consommations énergétiques finales et intermédiaires par produit ainsi que le niveau de désagrégation sectorielle permettent de modéliser les émissions des trois principaux gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). La méthodologie suivie pour le CH₄ et le N₂O repose sur les inventaires Corinair et est de type *bottom up* (similaire à celle suivie, par exemple, pour le modèle GREEN de l'OCDE). Pour le CO₂, les coefficients d'émission préconisés par le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat, IPCC en anglais) sont appliqués à chaque produit énergétique consommé. Il faut savoir que les marges d'erreur conférées aux inventaires sont très importantes (de l'ordre de 30 à 50 %) : elles résultent d'une incertitude à la fois sur les facteurs d'émission et sur les sources. Les émissions de CO₂ sont, par contre, connues de manière notablement plus fiables car elles résultent à 98 % de la combustion des énergies fossiles. Cette incertitude sur les émissions, aussi importante soit-elle, est davantage gênante en projection qu'en variante, ce qui justifie leur modélisation dans le modèle SPOT-E3 : en variante, l'erreur réalisée lors de l'inventaire disparaît. L'agrégation des trois gaz est

1. Cette section ne présente le modèle SPOT que de manière succincte et littéraire ; les spécifications complètes, les coefficients et la procédure de calibrage sont exposées en détail par Bréchet (1998a).

réalisée par l'entremise de leur potentiel de réchauffement global (PRG) : cela permet d'évaluer l'impact de la réduction de l'ensemble des trois gaz sur le changement climatique en tenant compte de leur contribution respective. Bien sûr, les indices de PRG préconisés par le GIEC sont utilisés.

Principales caractéristiques du modèle SPOT	
Secteurs productifs	Facteurs de production
1E. secteur producteur d'électricité	LH travail qualifié
1NE. secteur producteur d'énergie non électrique	LL travail non qualifié
2. secteur des biens intermédiaires	K capital physique
3. autres secteurs industriels	QE énergie
4. services marchands	QQ autres consommations intermédiaires
5. services non marchands	
	Produits énergétiques
	1. charbon
	3. coke
	4. produits pétroliers
	5. gaz naturel
	7. électricité
Catégories de consommation	Gaz à effet de serre
1. articles d'habillement	CO ₂ Dioxyde de carbone
2. mobilier, articles de ménage	CH ₄ Méthane
3. dépenses de transport	N ₂ O Protoxyde d'azote
3.1. achat de véhicules	
3.2. dépenses d'utilisation de véhicules	
3.3. services de transport	
4. alimentation	Types de ménages
5. loyers	H - à revenu moyen
6. chauffage, éclairage	L - à bas revenu (salaire minimum)
7. soins de santé	
8. communications	
9. loisirs	
10. équipements de loisir	Environnement international
11. autres biens et services	Zone MEP - Allemagne+France+Pays Bas
12. restaurants, cafés, hôtels	Zone OEP - reste de l'Union Européenne
	Zone ROW - reste du Monde

Le commerce extérieur est modélisé sur base de spécifications à la Armington vis-à-vis de trois zones géographiques : les trois principaux partenaires (Allemagne, France et Pays Bas), les autres pays de l'Union européenne et le reste du monde. Une certaine substitution des approvisionnements et une certaine ré-orientation des exportations sont donc acceptées en fonction de l'évolution des prix relatifs de chacune des zones et des prix domestiques. À noter que, pour chacun des agents (les six secteurs et les deux ménages), le modèle détermine une demande en produits importés pour chaque poste de la demande finale et intermédiaire. Cette modélisation permet de rendre compte du fait que les contenus importés varient fortement suivant le poste de la demande intérieure ou l'agent.

L'État collecte les recettes fiscales et parafiscales. La désagrégation du marché du travail et la distinction des deux ménages permet une modélisation fine des recettes de cotisations sociales personnelles et employeurs ainsi que de l'impôt sur le revenu. Les réductions structurelles des cotisations patronales sur les bas salaires sont présentes dans le modèle. Les dépenses publiques consistent en traitements et investissements publics. Les transferts aux ménages sont déterminés de manière à équilibrer le solde de la Sécurité sociale.

La règle de bouclage retenue dans le modèle est une règle néoclassique : le différentiel de taux d'intérêt avec le reste du monde s'ajuste à toute modification de la capacité de financement de l'économie belge.

Le modèle SPOT-E3 présente la particularité de combiner méthodes économétriques et techniques de calibrage. Tous les systèmes d'allocation ont été estimés économétriquement sur séries longues : demandes de produits énergétiques pour les entreprises et les ménages (Mertens, 1997), allocation de la consommation privée des deux ménages (Bracke et Bréchet, 1997). Le choix des élasticités de substitution des structures productives et des modules de commerce extérieur résulte de l'analyse des travaux économétriques disponibles en Belgique, et notamment des travaux réalisés récemment pour le modèle macroéconométrique HERMÈS utilisé au Bureau fédéral du Plan (Bossier *et al.*, 1993). Une fois les coefficients et les principaux paramètres connus (liés à la fiscalité, notamment), la phase de calibrage consiste, conformément à la méthodologie usuelle en modélisation d'équilibre général (Shoven et Whalley, 1992), à déterminer mathématiquement certains paramètres ou coefficients de manière à reproduire la situation de référence du système économique. L'année de base du modèle est 1994.

B. Modélisation d'un marché de permis négociables

La théorie montre qu'il existe une correspondance, en concurrence parfaite, entre le prix du permis librement négocié et le niveau de la taxe qui permettrait d'atteindre le niveau d'émission fixé comme plafond. Burniaux *et al.* (1992) utilisent cette propriété avec le modèle GREEN de l'OCDE : elle leur permet de simuler le modèle tantôt avec des contraintes sur les niveaux d'émissions, tantôt en introduisant une taxe ; dans le premier cas, le marché de permis négociables intervient dès que des échanges de permis sont autorisés entre les agents.

Cette approche duale est à opposer à l'approche primale qui consiste à incorporer explicitement au sein de la fonction de production les permis d'émission ; voir par exemple Mc Kibbin et Wilcoxon (1992) et (1995). Une description des protocoles de modélisation pour ces deux approches est proposée par Beaumais (1995). Le protocole suivi par ce dernier pour incorporer un marché de permis à polluer dans le modèle MÉGAPESTES est repris et adapté au modèle SPOT-E3.

De manière pratique, le fonctionnement du marché de permis négociables repose sur trois composantes :

- définition du plafond d'émission global ;
- répartition des quotas de permis entre les secteurs ;
- établissement du prix du permis qui permette de réaliser l'objectif fixé en autorisant les échanges de titres entre les agents.

L'attribution initiale de titres (quotas d'émissions) modifie cependant le calcul des frontières de prix. Considérons le programme d'une entreprise j représentative ; il s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Max } P_Q \cdot Q_j - P_{LL} \cdot LL_j - P_{LH} \cdot LH_j - P_K \cdot K_j - P_{QE} \cdot QE_j - P_{QQ} \cdot QQ_j$$

sous contrainte d'une fonction de production CES :

$$Q_j = \left(\alpha_1 \cdot LL_j^{\frac{1-\rho_j}{\rho_j}} + \alpha_2 \cdot LH_j^{\frac{1-\rho_j}{\rho_j}} + \alpha_3 \cdot K_j^{\frac{1-\rho_j}{\rho_j}} + \alpha_4 \cdot QE_j^{\frac{1-\rho_j}{\rho_j}} + \alpha_5 \cdot QQ_j^{\frac{1-\rho_j}{\rho_j}} \right)^{\frac{\rho_j}{\rho_j-1}}$$

où Q représente le volume de la production, LL l'emploi non qualifié, LH l'emploi qualifié, K le stock de capital, QE et QQ les consommations intermédiaires énergétiques et non énergétiques. On a $\sum_i \alpha_i = 1$.

En présence d'un marché de permis négociables, cette entreprise dispose d'une dotation exogène en permis d'émission : cette dotation initiale autorise l'émission d'une quantité notée $\overline{CO_2}_j$ de dioxyde de carbone. Si P_{PN} représente le prix du permis négociable et CO_2_j les émissions de CO_2 de l'entreprise j , ce programme devient :

$$\begin{aligned} \text{Max } & P_{Q_j} \cdot Q_j - P_{LL} \cdot LL_j - P_{LH} \cdot LH_j - P_K \cdot K_j \\ & - P_{QE} \cdot QE_j - P_{QQ} \cdot QQ_j - P_{PN} \cdot (CO_{2_j} - \overline{CO_{2_j}}) \end{aligned}$$

La frontière des prix s'écrit alors de la manière suivante :

$$\begin{aligned} P_{Q_j} \cdot Q_j = & P_{LL} \cdot LL_j + P_{LH} \cdot LH_j + P_K \cdot K_j + \\ & P_{QE} \cdot QE_j + P_{QQ} \cdot QQ_j + P_{PN} \cdot (CO_{2_j} - \overline{CO_{2_j}}) \end{aligned}$$

Toutes choses égales par ailleurs, la dotation initiale en droits allège donc le coût de la réduction des émissions de dioxyde de carbone. La somme retirée de la vente ou de l'achat de permis d'émission est donnée par :

$$F_j = P_{PN} \cdot (CO_{2_j} - \overline{CO_{2_j}})$$

La condition d'équilibre sur le marché implique que le prix du permis d'émission se fixe, par négociation, à un niveau tel que la demande en provenance des entreprises est égale à l'offre exogène fournie par l'État, offre qui correspond aux dotations initiales (voir Mensbrugghe, 1994). La somme des flux échangés entre les entreprises est donc nécessairement égale à zéro, et le plafond global d'émissions fixé par l'état est donc nécessairement respecté :

$$\sum_j F_j = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \sum_j CO_{2_j} = \sum_j \overline{CO_{2_j}}$$

SPOT-E3 modélise les consommations intermédiaires d'énergie pour cinq produits énergétiques par l'entremise des fonctions translog. La frontière de prix qui est modifiée est donc celle des consommations intermédiaires énergétiques à l'échelon le plus bas de l'arborescence des fonctions CES :

$$P_{QE_j} = \frac{\sum_{k=1}^n PE_j E_k \cdot EO_j E_k - P_{PN} \cdot (CO_{2_j} - \overline{CO_{2_j}})}{\sum_{k=1}^n EO_j E_k}$$

où $PE_j E_k$ représente le prix TTC du produit énergétique k pour le secteur j et $EO_j E_k$ la consommation en volume de ce produit.

Le protocole de simulation du marché de permis négociables dans le modèle est le suivant :

- fixer un objectif global de réduction des émissions $\overline{CO_2}$;
- définir les dotations initiales en permis de manière à respecter cet objectif global ; on doit avoir $\sum_j \overline{CO_{2j}} = \overline{CO_2}$;
- calculer par simulation du modèle le prix P_{PN} du permis qui permette d'atteindre l'objectif global, c'est-à-dire d'obtenir l'équilibre sur le marché des permis négociable, soit $\sum_j F_j = 0$.

Les conditions techniques de résolution du modèle sous le logiciel IODE sont présentées en annexe à la fin du document.

C. Avantages et limites du modèle SPOT-E3

La modélisation des relations économie - énergie - environnement fait l'objet de développements importants, développements suscités par la nécessité d'évaluation des politiques de lutte contre le changement climatique. La diversité des modèles résulte de nombreux facteurs structurels qui vont du niveau de désagrégation à l'échelon géographique en passant par l'horizon temporel ou la nature et le traitement des données statistiques. On considère généralement que l'analyse de la problématique s'enrichit de cette diversité et qu'il est chimérique de rêver d'un modèle "parfait". Du point de vue de l'analyse macroéconomique, trois grandes catégories de modèles peuvent être distinguées : les modèles macro-économétriques, les modèles d'optimisation et les modèles d'équilibre général (Zagamé, 1993). SPOT-E3 relève de la troisième catégorie : le modèle HERMÈS, traditionnellement utilisé au Bureau fédéral du Plan pour les projections à moyen terme et les analyses macro-énergétiques, relève de la première catégorie. Pourquoi développer un second modèle macro-énergétique, et quelle est la différence entre les deux modèles ?

Les modèles d'équilibre général s'appuient sur une représentation walrasienne de l'économie¹. Ils décrivent l'affectation des ressources dans une économie de marché en tant que résultante de l'interaction entre l'offre et la demande qui détermine des prix d'équilibre. Le mécanisme de ces modèles est composé des équations représentatives des comportements macroéconomiques des consommateurs, des producteurs et des administrations publiques ; la confrontation entre l'offre et la demande permet de déterminer les prix qui assurent cet équilibre ainsi que l'allocation des ressources et la répartition des revenus qui en résultent.

L'hypothèse de flexibilité des prix font que les modèles d'équilibre général sont naturellement portés sur l'analyse des questions de long terme. Ils n'ont cependant pas de vocation globalisante, c'est-à-dire à traiter de nombreux problèmes simultanément, à la différence des modèles macro-économétriques conçus pour évaluer les politiques de stabilisation macroéconomiques ; en l'occurrence, le modèle SPOT-E3 a été spécifiquement développé pour aborder les questions

1. Borges (1986) propose une introduction à la modélisation d'équilibre général et à ses utilisations pour l'évaluation des politiques économiques.

relatives à la fiscalité énergétique, aux mesures non fiscales et aux permis d'émission. Les modèles macro-économétriques relèvent quant à eux de la tradition néokeynésienne. Ils ne reposent pas sur l'hypothèse d'équilibre sur l'ensemble des marchés mais fonctionnent en régime keynésien d'insuffisance de la demande globale ; le chômage provient des contraintes de débouchés et de la rigidité des salaires. Pour cette raison, leur champ d'investigation est généralement limité au court-moyen terme (disons jusqu'à une dizaine d'années). Le fonctionnement des modèles néokeynésiens est fondamentalement guidé par la demande, même si des effets d'offre peuvent intervenir à court terme ; à moyen terme, les effet-prix sont en général laminés par la dynamique du multiplicateur-accélérateur et le modèle se cale sur un régime de concurrence monopolistique avec contrainte sur les débouchés. Cette propriété rend le modèle peu apte à définir des scénarios de long terme dans lesquels encadrer les politiques de l'environnement. Ces modèles sont estimés par des méthodes économétriques, ce qui légitime leur validation historique et autorise la réalisation de projections à court-moyen terme. L'usage de l'économétrie minore par contre la capacité du modèle à explorer le long terme en raison de l'hypothèse de permanence des comportements structurels sous-jacente à l'économétrie. Le modèle peut donc difficilement rendre compte de changements structurels, sinon en faisant appel à des méthodologies *ad hoc* (voir par exemple Beaumais et Bréchet, 1995). Le modèle d'équilibre général, de son côté, recourt à l'étalonnage de ses coefficients et paramètres, soit sur base de travaux économétriques, soit sur base d'informations disponibles par ailleurs. Le modèle est donc largement *a-historique*, ce qui constitue autant un avantage et qu'un danger ; l'avenir qu'il décrit est plus ouvert que celui des modèles économétriques (puisque'il se libère, à un degré variable suivant la volonté du modélisateur, de l'hypothèque du passé) mais, en l'absence de validation objective, le choix des coefficients est susceptible d'être arrêté de manière arbitraire et de biaiser le comportement du modèle dans un sens choix *a priori* par le modélisateur.

Cet ensemble de caractéristiques révèle bien la complémentarité des deux modèles, à la fois dans leur conception et dans leurs utilisations. L'horizon d'analyse de SPOT-E3 est d'emblée située au-delà de l'horizon du modèle HERMÈS ; la description de comportements optimisateurs explicites et la contrainte d'équilibre général assurent la cohérence théorique et le traitement intégré des comportements de demande et d'offre permet d'analyser les impacts de politiques modifiant les conditions d'offre. Dès l'origine, le modèle SPOT-E3 a été élaboré avec l'objectif d'incorporer dans un cadre théorique rigoureux des problématiques complémentaires à celles étudiées avec le modèle HERMÈS. Les permis d'émission négociables ou la diffusion des nouvelles technologies, développés dans ce Working Paper, constituent deux bons exemples. En outre, le modèle permet une analyse des effets d'une mesure de politique économique avec prise en considération des distorsions fiscales existantes (dans le cadre d'un optimum de second rang), dans la lignée des travaux de Parry, Williams et Goulder (1998) par exemple. Le modèle fournit des indications non seulement sur les impacts structurels des politiques considérées, mais également sous l'angle de la distribution des revenus et des variations de bien-être. Favorisant la dimension théorique à la dimension statistique et économétrique, le modèle pêche par contre par son côté abstrait, alors que le modèle HERMÈS reproduit avec précision les dynamiques économiques observées à moyen terme. Les résultats fournis par SPOT-E3 sont donc à considérer comme indicatifs des mouvements structurels de l'économie, et non comme des ordres de grandeur de nature prédictive, comme le ferait HERMÈS.

Les principales limites du modèle proviennent de certains types de spécifications théoriques et du niveau de désagrégation relativement faible. Principale faiblesse, l'hypothèse de concurrence parfaite, même si elle demeure relativement tenable à long terme, reste peu réaliste : l'introduction de concurrence monopolistique, de coûts d'ajustement ou de rigidités de prix (notamment sur le marché du travail) enrichiraient sensiblement le fonctionnement du modèle. Dans le cadre des politiques de lutte contre le changement climatique, la dynamisation du modèle constituerait un atout important qui permettrait d'évaluer les sentiers temporels d'ajustement tenant compte des inerties comportementales et des anticipations. Par contre, le modèle restera incapable de produire des scénarios prévisionnels. Enfin, du point de vue structurel, une désagrégation nettement plus poussée des comportements d'offre et de demande énergétiques serait souhaitable. À cet égard, il est dans la tradition des modèles d'équilibre général de pousser très loin la désagrégation, ce qui est facilité par les techniques de calibrage (il n'est pas nécessairement besoin de séries chronologiques longues). Pour le moment, la désagrégation du modèle SPOT-E3 a été volontairement limitée et est concentrée sur les comportements énergétiques afin de préserver une dimension maniable et aisément interprétable ; le modèle comporte environ 750 équations, ce qui en fait un modèle de taille moyenne. Modèle macro-économétrique de grande taille, HERMÈS compte, quant à lui, un peu plus de 2 000 équations dans sa version actuelle et offre une description beaucoup plus détaillée de certaines caractéristiques de l'économie belge (fiscalité indirecte, finances publiques et sectorialisation des secteurs productifs notamment). Sur ce point, également, les deux modèles sont donc complémentaires.



Modalités et impacts d'un marché de permis négociables sur les émissions de dioxyde de carbone

Le modèle SPOT-E3 permet de simuler les impacts macro-sectoriels et énergétiques de l'instauration d'un système de permis négociables sur les émissions de CO₂ en Belgique. Le grand nombre de pistes ouvertes pour la politique économique par cet instrument incite à l'exploration de nombreux scénarii. L'objet de cette section est d'entamer cette exploration en s'attachant à quatre problématiques que l'on peut considérer comme fondamentales ;

- la délicate question des dotations initiales de permis : le choix d'une dotation plutôt que d'une autre influence-t-il fortement les effets macro-sectoriels d'un système de permis ? Du point de vue d'un critère donné quelconque, est-il possible de rechercher une règle de dotation qui soit optimale ?
- la sensibilité de l'économie belge à l'instauration d'un marché de permis à l'échelon international : la Belgique doit-elle craindre un tel marché ? Existe-t-il des configurations qui lui soient plus favorables que d'autres ? Les impacts macroéconomiques sont-ils très influencés par l'internationalisation d'un tel marché ?
- l'opportunité de combiner les permis négociables avec des instruments fiscaux (taxation des énergies fossiles) ainsi que les possibilités d'apparition d'un double dividende (redéploiement fiscal) ;
- la manière dont l'instauration d'un marché de permis négociables peut favoriser l'exploitation des gisements d'économies d'énergie tels qu'évalués dans le Programme national belge de réduction des émissions de CO₂ : par l'imposition de quotas, les permis incitent en effet fortement à la mise en oeuvre de technologies moins intensives en énergie. La modélisation de fonctions de diffusion technologique est réalisée sur base des chiffrages micro-économiques effectués par Econotec avec le modèle *bottom-up* EPM : ces fonction permettent d'évaluer de manière endogène dans le modèle SPOT-E3, en interaction avec le marché des permis d'émission, la diffusion des 33 options technologies économisatrices d'énergie dans les secteurs industriels et le tertiaire et leur impact sur les variables macro-sectorielles.

A. Dotation uniforme et dotations alternatives

Cette première variante (qui constituera par la suite la variante de référence) présente les caractéristiques suivantes :

- imposition de quotas correspondant à une réduction de 10 % des émissions globales de CO₂ ;
- répartition uniforme du quota sur tous les secteurs ;
- application à tous les secteurs productifs (production d'énergie électrique, production d'énergie non électrique, biens intermédiaires, autres secteurs industriels et services marchands) ; les ménages ne sont pas impliqués ;
- instauration isolée en Belgique.

Les difficultés pratiques que soulèverait l'instauration d'un système de permis négociables pour les ménages justifie le fait de les exclure ; tous les secteurs productifs sont impliqués dans le système, y compris les deux secteurs producteurs d'énergie. Les permis portent uniquement sur les émissions de CO₂ ; la possibilité d'une l'approche multigaz (avec agrégation des trois gaz par leur potentiel de réchauffement global) sera discutée à l'aune des enseignements fournis par cette première variante.

L'influence du choix des dotations initiales sur les effets macro-sectoriels est évaluée à l'aide de deux simulations alternatives représentant des configurations symétriques :

- renforcement de l'effort imposé aux secteurs industriels non énergétiques, soit -15 % par rapport à la situation de référence : le plafond d'émission pour les autres secteurs (*IE*, *INE* et *4*) est relevé de manière à obtenir, comme précédemment, une réduction globale des émissions de 10 % ; le nouveau quota imposé à ces trois secteurs correspond alors à une réduction de 9 % par rapport à l'équilibre de référence ;
- la variante symétrique est testée, à savoir un allègement de l'effort demandé à ces deux secteurs industriels à -5 % accompagné d'un renforcement pour les trois autres secteurs à -12 % (correspondant toujours à une réduction globale des émissions de CO₂ de 10 %).

Les résultats macro-sectoriels de ces trois simulations sont exposés dans le tableau 1 et les flux d'achat et de vente de permis entre les secteurs dans le tableau 2. Les émissions de gaz à effet de serre sont présentées dans le tableau 3.

Afin d'explicitier au mieux les mécanismes en vigueur, la première simulation est commentée plus en détail dans un premier temps. Les deux autres simulations seront davantage analysées par rapport à cette première variante afin d'évaluer les enjeux de dotations initiales alternatives.

TABLEAU 1 - Impacts macro-sectoriel d'un marché de permis négociables
(différences en % par rapport à l'équilibre de référence)

	Dotation uniforme	Dotation réduite pour les secteurs (2) & (3)	Dotation accrue pour les secteurs (2) & (3)
PIB	-0,34	-0,45	-0,23
Consommation privée	-0,82	-0,83	-0,82
Investissement privé	0,15	0,04	0,26
Consommation publique	-0,32	-0,36	-0,28
Demande finale intérieure	-0,57	-0,59	-0,54
Exportations	-0,33	-0,48	-0,18
Importations	-0,55	-0,62	-0,47
Prix à la consommation	0,78	0,76	0,79
Salaire réel	-0,77	-0,76	-0,78
Prix des importations	0,00	0,00	0,00
Prix des exportations	0,35	0,47	0,24
Prix de l'investissement	-0,32	-0,23	-0,40
Prix de production	0,77	0,84	0,70
Taux d'intérêt (<i>diff. en pt de %</i>)	-0,20	-0,18	-0,21
Emploi total	-0,34	-0,39	-0,29
Revenu disponible réel	-1,12	-1,15	-1,09
Résultats sectoriels			
Emploi			
- bas salaires	-0,30	-0,34	-0,27
- autres salaires	-0,35	-0,40	-0,30
- secteurs énergétiques	-2,26	-2,24	-2,26
- biens intermédiaires	-1,07	-1,38	-0,76
- autres industries	-0,27	-0,29	-0,25
- services marchands	-0,27	-0,32	-0,23
Production			
- secteurs énergétiques	-2,27	-2,29	-2,24
- biens intermédiaires	-1,25	-1,65	-0,85
- autres industries	0,04	-0,04	0,12
- services marchands	-0,34	-0,34	-0,33
Prix de production			
- secteurs énergétiques	9,17	8,93	9,36
- biens intermédiaires	1,29	1,68	0,90
- autres industries	-0,44	-0,32	-0,55
- services marchands	0,32	0,26	0,37
Exportations			
- secteurs énergétiques	-1,31	-1,28	-1,32
- biens intermédiaires	-1,86	-2,41	-1,30
- autres industries	0,38	0,27	0,47
- services marchands	-0,21	-0,17	-0,24
Importations			
- secteurs énergétiques	-3,79	-3,76	-3,81
- biens intermédiaires	-0,42	-0,60	-0,24
- autres industries	-0,32	-0,35	-0,29
- services marchands	-0,21	-0,32	-0,10

Les impacts économiques de dotations sectorielles uniformes

L'imposition de quotas d'émission sur les émissions de CO₂ exerce une influence négative sur l'activité économique via l'élévation du coût de production des entreprises. Au niveau macroéconomique, le prix de production s'élève de près de 0,8 % par rapport à l'équilibre de référence. Cette hausse des coûts se traduit par une perte conséquente de compétitivité (les exportations globales baissent de 0,3 %) et une élévation du niveau des prix à la consommation (0,8 %). La diminution des revenus réels qui en résulte provoque ainsi un repli de la consommation et décourage l'offre de travail. Le repli du volume de production s'accompagne alors d'une diminution sensible de l'emploi (-0,3 %). Cet effet est toutefois modéré par les substitutions en faveur du facteur travail provoquées par le renchérissement des consommations intermédiaires énergétiques les plus intensives en dioxyde de carbone.

La légère réduction du taux d'intérêt traduit une réduction du besoin de financement de l'économie grâce à l'amélioration du solde courant ; cette réduction encourage la formation brute de capital fixe et modère la hausse des coûts de production. La réduction de la facture énergétique vis à vis du reste du monde concourt donc de manière sensible à réduire les impacts récessifs de l'imposition des quotas d'émission.

Les impacts sectoriels de la variante sont sensiblement différents suivant le secteur. La hausse du prix de production sectoriel est influencée, initialement, par le contenu en CO₂ de la production, mais également par l'achat ou la vente de permis d'émission et l'intensité capitalistique. Les secteurs dont la hausse de coût est la plus marquée sont, en premier lieu, les deux secteurs producteurs d'énergie (6,2 %), puis le secteur des biens intermédiaires (1,3 %). Dans le premier cas, l'intensité énergétique et le coût marginal de réduction des émissions de CO₂ sont élevés (les deux secteurs sont acheteurs de permis) ; dans les biens intermédiaires, le coût marginal de réduction des émissions est plus faible et permet aux entreprises de vendre des permis, ce qui allège leur coût de production. Le secteur des autres industries voit quant à lui son prix de production légèrement diminuer grâce aux effets conjugués d'une vente de permis et de la baisse du coût d'usage du capital (intensité capitalistique élevée). Enfin, le secteur des services marchands, moins intensif en énergie fossile, révèle un coût marginal de réduction relativement élevé et l'achat de permis alourdit ses coûts de production.

Le volume de la production est en repli dans tous les secteurs, à l'exception des autres secteurs industriels pour lesquels un gain de compétitivité est enregistré (hausse du volume des exportations de 0,2 %).

Les achats et les ventes de permis entre les secteurs

L'analyse des flux d'achat ou de vente de permis (présentés dans le tableau 2) montre que les ventes se concentrent pour l'essentiel sur le secteur des biens intermédiaires ; les autres secteurs industriels sont également vendeurs, mais pour à peine plus d'un milliards de FB. Les trois autres secteurs se répartissent plus ou moins équitablement les achats. Une répartition initiale uniforme des quotas entre les secteurs (pour un quota global équivalent à une réduction globale de 10 % des émissions) favorise donc, en termes relatifs, les secteurs exposés.

Le volume des échanges de permis s'élève à un peu plus de 5,4 milliards de FB, soit environ 0,06 % du PIB. Le prix du permis atteint 762 FB par tonne de CO₂. Ce résultat est cohérent avec deux études récentes réalisés avec des modèles d'équi-

libre général. Conrad et Schmidt (1995), pour une réduction d'émission de 10 %, avec implication des ménages dans le marché des permis, obtiennent un prix d'équilibre de 436 FB par tonne de CO₂ en Belgique isolée ; lorsque le marché des permis s'ouvre à l'ensemble de l'Union Européenne, le prix du permis atteint 945 FB. Böhringer *et al.* (1998), avec un modèle agrégé de l'Union, obtiennent un prix d'équilibre de 1 600 FB par tonne de CO₂ pour une réduction de 14 % des émissions en 2010. Le prix du permis obtenu ici peut également être comparé aux différents montants de taxes CO₂ ou CO₂/énergie déjà évoqués dans la littérature. Par exemple, Bossier et de Rous (1992) montrent, avec le modèle macroéconométrique belge HERMÈS, qu'une taxe de 1 000 FB par tonne de CO₂ permettrait d'obtenir une réduction des émissions totales de 8 % après quatre ans. Quant à la proposition de taxe CO₂/énergie de 10 \$ par baril formulée par la Commission Européenne en 1992 (Commission Européenne, 1992), elle équivaut *grosso modo* à une taxe de 1 300 FB par tonne de CO₂.

TABLEAU 2 - Achats (+) et ventes (-) de permis d'émission
(en milliards de FB)

	Dotation uniforme	Dotation réduite pour les secteurs (2) & (3)	Dotation accrue pour les secteurs (2) & (3)
Secteurs producteurs d'énergie :			
- énergie électrique	2,31	0,30	4,30
- énergie non électrique	2,46	0,58	4,25
Biens intermédiaires	-3,97	3,68	-11,18
Autres industries	-1,39	1,26	-3,85
Services marchands	0,58	-5,82	6,48
Ensemble de l'économie	0,00	0,00	0,00
Prix du permis (FB/tCO ₂)	762,76	779,58	742,01

Réduction des émissions de gaz à effet de serre

Les émissions des trois gaz considérés dans le modèle sont présentées dans le tableau 3. On retrouve le résultat selon lequel les biens intermédiaires et les autres secteurs industriels réduisent leurs émissions au-delà du quota qui leur est fixé (respectivement -13,4 % et -12,9 %). Les émissions de CO₂ imputables aux ménages sont également réduites, d'une part grâce au repli du niveau global de la consommation, mais également du fait de la hausse du prix des produits énergétiques livrés par les deux secteurs producteurs (produits raffinés et énergie électrique).

Au total, les émissions de CO₂ sont réduites de 8 % (pour rappel, les émissions des secteurs productifs sont réduites de 10 % par hypothèse). Les émissions des autres gaz sont toutes également réduites, mais essentiellement dans leurs usages énergétiques. Plus précisément, les émissions d'origine énergétique du méthane sont réduites de 12,1 % et celles du protoxyde d'azote de 9,2 %. Les autres usages sont également en repli, mais dans une moindre mesure, ce qui explique (avec l'absence de mesure sur les ménages) l'impact limité sur les émissions globales : -0,36 % pour le CH₄ et -2,33 pour le N₂O. Exprimées en équivalent CO₂, les émissions totales de ces trois gaz sont réduites de 2,84 %.

TABEAU 3 - Impacts d'un marché de permis négociables sur les émissions de gaz à effet de serre
(différences en % par rapport à l'équilibre de référence)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total en équivalent CO ₂
Dotation uniforme				
Secteurs énergétiques	-6,37	-8,45	-10,67	-8,77
Biens intermédiaires	-13,42	-2,48	-0,84	-1,82
Autres industries	-12,95	-23,36	-16,69	-15,57
Services marchands	-9,64	-11,27	-10,97	-10,25
Ménages	-1,83	-0,40	-3,69	-2,28
Total	-8,04	-0,36	-2,33	-2,84
Intensité de la production en GES	-8,92	0,10	-1,77	-2,49
Intensité de la consommation privée en GES	-1,01	0,43	-2,89	-1,47
Dotation réduite pour les secteurs (2) & (3)				
Secteurs énergétiques	-6,34	-8,42	-10,63	-8,73
Biens intermédiaires	-11,90	-2,52	-1,03	-1,88
Autres industries	-12,38	-23,16	-16,22	-15,07
Services marchands	-11,15	-12,82	-12,52	-11,78
Ménages	-1,81	-0,41	-3,65	-2,26
Total	-8,10	-0,39	-2,45	-2,95
Intensité de la production en GES	-8,90	0,16	-1,80	-2,51
Intensité de la consommation privée en GES	-0,99	0,41	-2,84	-1,45
Dotation accrue pour les secteurs (2) & (3)				
Secteurs énergétiques	-6,34	-8,42	-10,63	-8,73
Biens intermédiaires	-14,88	-2,43	-0,65	-1,76
Autres industries	-13,44	-23,45	-17,07	-15,98
Services marchands	-8,25	-9,83	-9,54	-8,85
Ménages	-1,84	-0,38	-3,71	-2,29
Total	-7,99	-0,33	-2,21	-2,73
Intensité de la production en GES	-8,94	0,04	-1,73	-2,47
Intensité de la consommation privée en GES	-1,03	0,44	-2,92	-1,48

Les résultats de cette première variante permettent déjà de tirer un certain nombre de conclusions. En premier lieu, ils confirment que l'intensité énergétique, voire même l'intensité en carbone de la production d'un secteur, ne sont pas des indicateurs fiables de son coût marginal de réduction. Celui-ci dépend essentiellement, *ex ante*, des élasticités de substitution, mais également, *ex post*, des retombées macro-sectorielles en terme de prix et de demande adressée. À cet égard, la simulation des effets du système de permis dans un cadre d'équilibre général montre à quel point les effets induits peuvent influencer les résultats. Leur prise en compte confirme l'intérêt, même sans l'introduction de mesures fiscales complémentaires, de cette approche par rapport aux modèles *bottom up*.¹

1. Les modèles *bottom up* se distinguent des modèles macroéconomiques (dits *top down*) par une description explicite des technologies et un degré de détail plus élevé ; les conditions de rationalité économique y sont d'ordre microéconomique et l'environnement macroéconomique demeure en général exogène (détermination des prix par exemple). Pour une comparaison entre les approches *top down* et *bottom up*, voir par exemple Wilson et Swisher (1993).

La simulation a également mis en exergue la principale difficulté rencontrée par une approche multigaz : la prise en compte de l'origine des émissions. En effet, si 98 % des émissions de CO₂ proviennent de la combustion d'énergies fossiles, cette proportion est nettement plus réduite pour le CH₄ et le N₂O, ce qui implique qu'un système de régulation de ces deux gaz doit également porter sur le type de procédé industriel ou sur le volume de production et de consommation. La propriété de correspondance entre approche duale et primale n'étant plus vérifiée, des développements supplémentaires devraient sans doute être apportés au modèle.

Enfin, il est à noter que les effets relativement positifs de cette variante sur les effluents sont obtenus avec une réduction somme toute limitée de l'activité économique (le volume de la production est réduit de 0,4 %) et sans qu'aucune mesure ne soit imposée aux ménages. Par rapport aux effets nettement récessifs d'une taxe de type CO₂/énergie, il semble donc que le système de permis réduise notamment le coût économique de la réduction des émissions grâce au système d'échanges : la réduction d'émission est effectuée dans les secteurs où elle est la moins coûteuse. La condition d'existence de "pollueurs efficaces", présentée dans la section précédente, est pleinement vérifiée ici : les différences de coûts marginaux sectoriels sont importantes et donnent tout son intérêt au système de permis.

Les effets de dotations sectorielles différenciées

La simulation précédente a montré que deux secteurs se distinguent par un coût marginal de réduction des émissions de CO₂ inférieur à la moyenne macroéconomique : les biens intermédiaires (secteur 2) et les autres secteurs industriels (secteur 3). Il est donc *a priori* tentant, dans une recherche de la minimisation du coût global de réduction des émissions, de concentrer l'effort de réduction sur ces deux secteurs et de l'alléger sur les trois autres. À titre analytique, la configuration symétrique est également testée. Dans cette perspective, la réduction d'émission des secteurs productifs sera bien entendu strictement identique (réduction de 10 % par hypothèse), mais il est nécessaire de simuler le modèle pour évaluer l'impact de ces dotations alternatives sur les variables macrosectorielles.

Le tableau 1 montre qu'une réduction de la dotation initiale dans les secteurs (2) et (3) se traduit par un impact récessif plus fort que dans la variante de référence. Ce résultat (qui peut sembler paradoxal) s'explique en premier lieu par les mécanismes suivants :

- avec l'imposition de quotas plus sévères, les secteurs (2) et (3) deviennent acheteurs de permis (au lieu de vendeurs dans la variante précédente) ; leur prix de production en est alourdi d'autant ;
- il s'en suit des pertes de compétitivité importantes qui, du fait que ces deux secteurs sont les plus ouverts à la concurrence internationale, handicapent sensiblement l'activité économique globale.

Corrélativement, le secteur des services marchands et, marginalement, celui de la production d'énergie électrique deviennent vendeurs de permis grâce à l'accroissement de leur dotation initiale. Leur prix de production s'élève donc moins. Cet effet exerce une influence positive sur les prix à la consommation (notamment grâce à la hausse moins importante du prix de l'électricité) qui augmentent légè-

rement moins (0,76 % contre 0,78 % auparavant) malgré une hausse plus importante du prix de production moyen (0,84 % contre 0,77 %). Cet effet ne compense cependant pas les pertes de compétitivité supplémentaires enregistrées dans les deux secteurs industriels.

La dégradation du solde courant engendre une moindre réduction du taux d'intérêt, ce qui renchérit l'investissement et handicape (par rapport à la variante avec dotations uniformes) le secteur des autres industries. Enfin, dans tous les secteurs le volume de travail est davantage réduit, y compris les services marchands pour lesquelles la vente massive de permis allège le coût énergétique.

Le prix d'équilibre du permis d'émission est augmenté : il passe de 762 à 779 FB par tonne de CO₂, ce qui traduit le fait que, globalement, le coût marginal de réduction des émissions s'est élevé. En outre, les échanges sur le marché des permis passent de 5,4 milliards à 5,8 milliards de FB, avec dorénavant un monopole de la part des services marchands.

La seconde variante présente logiquement une physionomie symétrique : l'activité économique générale est moins déprimée (réduction du PIB de 0,23 %, contre 0,34 % dans la variante avec dotations uniformes) grâce à une contraction nettement plus faible du volume des exportations. L'allègement de l'effort demandé aux secteurs (2) et (3) se traduit *ex ante* par une réduction du coût marginal global qui, *ex post*, est compensée par les effets négatifs inhérents aux pertes supplémentaires de compétitivité. Il en ressort que :

- même si les secteurs (2) et (3) ont un coût marginal de réduction des émissions relativement faible, un renforcement de leur effort de réduction se traduit par une dégradation importante de la position compétitive et des effets nets négatifs pour l'économie belge ;
- les courbes de coût marginal des différents secteurs n'ont clairement pas la même pente, ce qui signifie qu'une modification, même légère, des dotations relatives entre les secteurs peut considérablement altérer le coût marginal global de la réduction des émissions.

La comparaison de ces variantes révèle que des dotations alternatives peuvent avoir des effets macroéconomiques sensiblement différents, quoique plus ou moins marqués suivant la variable considérée. On constate également que, sans le cadre d'équilibre général, il serait impossible de rendre compte de l'importance des mécanismes de rétroaction macro-sectoriels, alors même que ceux-ci exercent une influence déterminante sur le profil des résultats.

B. L'influence d'un marché international de permis négociables

L'instauration d'un marché de permis négociables à l'échelon international est susceptible d'exercer sur une petite économie telle que la Belgique une influence sensible. Plusieurs configurations sont envisageables pour un tel système, notamment celle de marchés "emboîtés" : le marché international fixe le prix des permis échangés entre les pays, puis l'allocation entre les agents individuels est réalisée à l'échelon national sous contrainte du quota global. Cette réallocation de la charge de la réduction des émissions peut faire l'objet d'un marché de permis domestique, comme ce qui a été simulé ci-dessus ¹.

Peu d'évaluations ont été effectuées jusqu'alors par des modèles internationaux sur les impacts d'un marché international de permis d'émission avec un traitement explicite des pays européens : voir Böhringer *et al.* (1998), Conrad et Schmidt (1995). Les modèles mondiaux, tels que G-CUBED (McKibbin et Wilcoxon, 1995), GREEN (Burniaux *et al.*, 1992), ou MEGABARE (ABARE, 1995) fonctionnent le plus souvent avec des zones géographiques agrégées. L'information fournie par les modèles technologiques pourrait sans doute être utilisée : les études réalisées avec le modèle MARKAL et exposées par Kram (1994) et (1993), par exemple, fournissent les courbes de coût marginal de chaque pays pour un ensemble d'options de réduction des émissions. L'inconvénient est que ces modèles définissent le coût marginal de réduction pour des options technologiques données et sans prise en compte des impacts économiques induits. Il n'est donc pas certain que, en intégrant les réactions macro-sectorielles en terme de prix et de volume, le profil des courbes de coûts de chaque pays reste le même.

Présentation de la méthodologie

Face à la diversité des rares résultats jusqu'alors fournis par les modèles internationaux pour la Belgique, on a jugé préférable d'adopter une technique de balayage pour les hypothèses d'environnement international. Par rapport à un choix d'hypothèse unique et forcément arbitraire, cette option offre l'avantage d'évaluer la sensibilité de la Belgique aux différents paramètres indéterminés.

En ce qui concerne le prix d'équilibre du permis international, trois cas sont envisageables : le prix du permis international peut être supérieur, inférieur ou égal au prix que fixerait le marché national de permis négociables pour respecter son quota.

Dans le premier cas, les entreprises nationales pourront vendre des permis sur le marché international et le coût supporté pour respecter son quota en sera allégé d'autant ; dans le second cas, les entreprises nationales devront acheter des permis. Dans les deux cas, les émissions nationales ne sont jamais égales au quota puisqu'il y a achat ou vente de permis d'émission. C'est le quota international qui est respecté.

Il serait toutefois irréaliste de procéder à ces simulations en oubliant que l'instauration d'un marché international de permis d'émission se traduirait par une hausse des coûts de production chez l'ensemble des partenaires commerciaux de la Belgique. Les enjeux en terme de compétitivité seront nettement dépendants de

1. Sur l'organisation d'un marché de permis négociables dans la lutte contre le changement climatique, voir notamment Wiener (1997), Mullins et Baron (1997).

ces évolutions. La variation des prix internationaux devrait être considérée conjointement avec le niveau du prix d'équilibre des permis d'émission, et ce pour chaque zone et secteur constitutifs de l'environnement international du modèle SPOT (trois zones géographiques et cinq secteurs productifs). En l'absence de chiffres précis en la matière, un balayage a été réalisé sur le prix des biens et services de référence du commerce international pour l'ensemble des zones géographiques et secteurs. Les valeurs alternatives consistent en une hausse, par rapport à l'équilibre de référence, de 0,25 et 0,50 %.

Les balayages sont effectués pour toutes les combinaisons de prix du permis international et de prix des biens et services, soit 15 simulations distinctes¹.

L'équation de la balance des paiements est modifiée pour tenir compte des flux d'achat ou de vente de permis entre la Belgique et le reste du monde.

Sensibilité du PIB à l'environnement international

Les simulations montrent que les impacts récessifs de l'imposition du quota d'émission sont sensiblement atténués lorsque le prix international du permis d'émission se fixe à un niveau supérieur au prix d'équilibre national (tableau 4). La réduction du PIB passe de -0,34 % à -0,10 % lorsque le prix international est de 50 % supérieur aux prix d'équilibre en autarcie. Dans le cas d'un prix inférieur de 50 % au prix d'équilibre national, les mécanismes sont inverses mais non symétriques du fait des non linéarités présentes dans le modèle (croissance du coût marginal). Ce premier balayage révèle que, sans altération du prix des biens et services chez les partenaires commerciaux, un prix du permis international 1,7 fois supérieur au prix d'équilibre domestique (soit 1 296 FB par tonne de CO₂) neutralise l'impact négatif sur le PIB.

Ces résultats sont néanmoins extrêmement sensibles à toute modification de l'environnement international sur le marché des biens et services. Dans l'hypothèse d'une hausse des coûts de production des partenaires commerciaux, les pertes de compétitivité de l'économie belge s'amenuisent de manière notable et l'impact sur le PIB se résorbe rapidement. Avec un prix international du permis d'émission égal au prix d'équilibre en autarcie, une hausse des prix du commerce mondial de 0,75 % permet de ramener le PIB à sa valeur de référence.

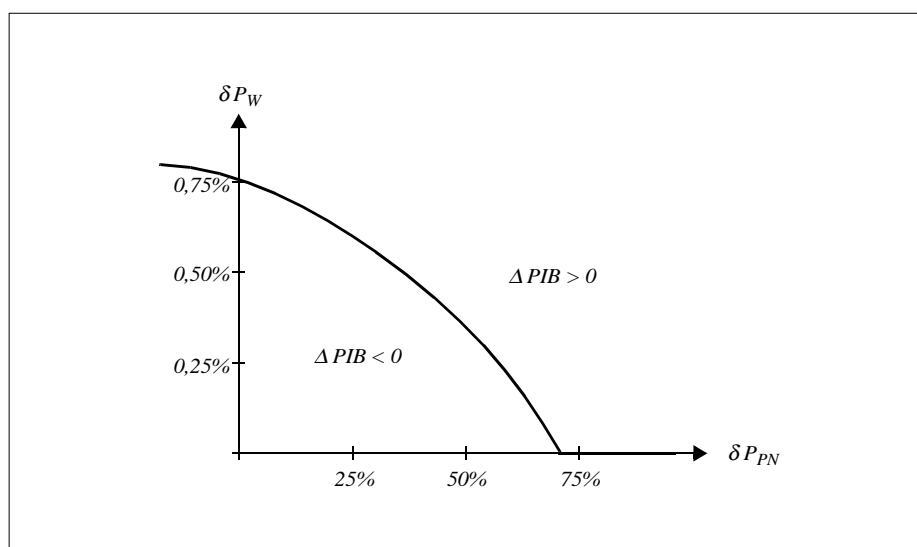
Lorsque ces deux effets se conjuguent (prix du permis supérieur au prix d'équilibre en autarcie et hausse des prix de production des partenaires commerciaux), l'impact du quota d'émissions devient rapidement positif sur le PIB. Le modèle permet de déterminer l'ensemble des couples de valeur pour ces deux prix tels que l'impact sur le PIB soit nul : cet ensemble est représenté par la courbe sur la figure 1. Au-dessus de cette courbe, l'impact sur le PIB est positif car, pour un prix du permis donné, les gains de compétitivité en compensent les effets récessifs ; réciproquement, l'impact sur le PIB est négatif en-dessous de la courbe.

1. On peut relever à juste titre que les combinaisons où le prix international des biens et services est inchangé sont peu vraisemblables : elles sont réalisées ici essentiellement à titre technique.

TABEAU 4 - Effet sur le PIB d'environnements internationaux alternatifs
(différences en % par rapport à l'équilibre de référence)

Prix du permis international	-50 %	-25 %	0 %	+25 %	+50 %
Prix mondial des biens et services					
0 %	-0,53	-0,45	-0,34	-0,23	-0,10
+0,25 %	-0,42	-0,33	-0,23	-0,12	-0,01
+0,50 %	-0,30	-0,21	-0,12	-0,01	0,11

FIGURE 1 - Impact du quota d'émission sur le PIB en fonction du prix du permis international et du prix des biens et services



Sensibilité de l'emploi à l'environnement international

Les impacts sur le facteur travail (tableau 5) sont plus complexes à analyser car ils mettent en jeu de nombreux phénomènes structurels. Lorsque le prix du permis international s'élève, les pertes d'emploi s'accroissent en Belgique. Par ailleurs, toute amélioration de la compétitivité entraîne une amélioration sensible de la situation de l'emploi. Si le second effet est conforme à l'intuition, le premier l'est moins. Lorsque le prix du permis d'émission s'élève, deux effets apparaissent : un effet de substitution qui pousse les entreprises à favoriser les autres facteurs de production, et un effet revenu qui résulte de la vente des permis à l'étranger et soutient le volume de la production et la demande pour l'ensemble des facteurs grâce à la réduction du coût total de production. Dans les secteurs industriels, l'effet revenu l'emporte sur l'effet de substitution : l'emploi augmente au même titre que la production (mais dans une moindre proportion). Par contre, dans les services marchands, c'est l'effet de substitution qui domine. La différence de réaction des deux types de secteurs s'explique par le fait que la pente de la courbe de coût marginal de réduction des émissions soit plus faible dans les services marchands, ce qui amène ce secteur à vendre de manière massive des permis, réduisant d'autant sa facture énergétique. Cet effet, conjointement à la réduction du coût d'usage du capital, permet au secteur de réduire le coût de l'agrégat factoriel $K-E$, ce qui défavorise (en termes relatifs) le facteur travail, tandis que la production s'élève peu. Cette faiblesse des effets revenus dans les services marchands provient du fait que, pour l'essentiel, l'accroissement de la production résulte des gains à l'exportation, ce qui favorise surtout les secteurs industriels

(par rapport à la variante de référence, le volume des exportations passe ainsi de -0,33 % à -0,04 % ; la demande intérieure finale passe de -0,57 % à -0,61 %).

En définitive, il ne faut probablement pas compter sur un système international de permis pour obtenir à la fois le respect des quotas d'émission et un impact positif sur l'emploi. Il faudrait pour cela que le prix international du permis soit nettement inférieur au prix d'équilibre en autarcie et que la hausse des coûts de production des partenaires commerciaux soit très importante. Par exemple, si le prix du permis est inférieur de 50 %, le modèle indique qu'une hausse des prix des biens et services de près de 1 % est nécessaire pour neutraliser les effets dépressifs sur l'emploi. Cette contrainte est relativement incontournable puisque la réduction des émissions passe essentiellement par les substitutions factorielles avec, grâce à la possibilité d'échanges de permis, une perte minimale sur le volume de la production.

TABLEAU 5 - Effet sur l'emploi d'environnements internationaux alternatifs
(différences en % par rapport à l'équilibre de référence)

Prix du permis international	-50 %	-25 %	0 %	+25 %	+50 %
Prix mondial des biens et services					
0	-0,22	-0,28	-0,34	-0,40	-0,47
+0,25	-0,16	-0,22	-0,28	-0,34	-0,41
+0,50	-0,10	-0,16	-0,22	-0,28	-0,35

Sensibilité des émissions de GES à l'environnement international

La réduction des émissions de gaz à effet de serre est renforcée lorsque le prix du permis international s'élève. Ce prix s'établit alors au-dessus du coût marginal moyen de l'économie et il est optimal pour les entreprises de réduire davantage leurs émissions et de vendre des permis. À partir d'un certain prix (environ +23 %), tous les secteurs, hormis la production électrique, deviennent vendeurs de permis. Lorsque le prix du permis international atteint 1,5 fois le prix d'équilibre en autarcie, le flux total des ventes vers le reste du monde s'élève à quelque 40 milliards de FB. Par contre, en cas de prix inférieur au prix domestique, les achats se limitent à une douzaine de milliards. Ces ventes sont relativement peu influencées par les hypothèses formulées sur les prix des biens et services.

TABLEAU 6 - Effet sur les émissions de GES d'environnements internationaux alternatifs
(différences en % par rapport à l'équilibre de référence)

Prix du permis international	-50 %	-25 %	0 %	+25 %	+50 %
Prix mondial des biens et services					
0	-1,69	-2,27	-2,84	-3,41	-4,03
+0,25	-1,62	-2,20	-2,77	-3,34	-3,95
+0,50	-1,55	-2,13	-2,70	-3,27	-3,88

TABLEAU 7 - Effet sur les flux intersectoriels de permis d'environnements internationaux alternatifs
(en milliards de FB)

Prix du permis international	-50 %	-25 %	0 %	+25 %	+50 %
Prix mondial des biens et services					
0	11,81	8,99	0,00	-15,93	-40,54
+0,25	11,96	9,25	0,35	-15,40	-39,70
+0,50	12,11	9,50	0,74	-14,87	-39,03

Deux conclusions ressortent de cet exercice. En premier lieu, l'instauration d'un marché domestique de permis négociables intégré au sein d'un marché international peut exercer une influence non négligeable sur l'économie belge. Cette influence est tributaire de la courbe de coût marginal de réduction des émissions et des contraintes de compétitivité avec le reste du monde. Les différences de comportement sectoriel jouent également un rôle important dans l'explication du profil macroéconomique. À cet égard, il serait nécessaire de formuler plus précisément les hypothèses de modification des coûts de production chez les partenaires, notamment en estimant les courbes de coût marginal de réduction des émissions par zone géographique et par secteur d'activité. En second lieu, même si les impacts négatifs sur l'activité économique sont susceptibles d'être compensés par des gains de compétitivité, il ne faut vraisemblablement pas s'attendre à un effet positif sur l'emploi. En la matière, la nécessité de mesures d'accompagnement subsiste.

C. Combiner permis négociables et mesures fiscales

L'élaboration d'une stratégie efficace de limitation des émissions de gaz à effet de serre repose, selon de nombreux auteurs, sur la complémentarité des mesures (CGP, 1993), mais aussi sur l'adéquation de l'instrument avec le groupe cible (Lenstra, 1993). L'idée de combiner un système de permis d'émission négociables avec des instruments fiscaux repose à ce point de vue sur deux constatations :

- l'instrument fiscal est mieux adapté qu'un marché de permis pour orienter les modes de consommation privés et atteindre de manière efficace le groupe cible que représentent les ménages ;
- l'imposition de quotas d'émission aux entreprises se traduit par une élévation de leurs coûts de production que certaines mesures fiscales permettrait peut-être d'alléger ; dans le cadre des débats récents sur les politiques de l'emploi, on songe évidemment à une réduction des charges sur le facteur travail.

Imposition de quotas d'émission pour les entreprises et alourdissement de la fiscalité énergétique pour les ménages

Dans cette double perspective, le recours à une taxe sur le CO₂ et/ou l'énergie ouvre des possibilités intéressantes en terme d'incitation pour les ménages et, via les recettes budgétaires générées par la taxe, de redéploiement fiscal. Une telle taxe peut-elle efficacement, en s'adressant aux ménages, compléter les effets d'un marché de permis négociables instauré pour les entreprises et est-il possible de supprimer le surcoût lié à l'imposition des quotas ? Pour appréhender ces questions, deux simulations ont été réalisées ; toutes deux supposent l'instauration d'un marché de permis d'émission négociables pour les entreprises avec une répartition uniforme de l'effort de réduction des émissions de gaz à effet de serre à

-10 % par rapport au niveau de référence. Chacune de ces deux simulations considère en outre l'introduction des mesures fiscales suivantes :

- instauration d'une taxe CO₂ sur les ménages et réduction généralisée des cotisations sociales employeurs sous contrainte de neutralité budgétaire *ex post* ; le niveau de la taxe est calibré de manière à obtenir *ex post* une réduction des émissions de CO₂ des ménages de 10 % ;
- alourdissement de la TVA sur les produits énergétiques et réduction généralisée des cotisations sociales employeurs sous contrainte de neutralité budgétaire *ex post* ; l'accroissement de la TVA est calibré de manière à obtenir *ex post* la même recette budgétaire que la taxe CO₂ précédente.

L'introduction d'une taxe énergie sur les ménages a pour conséquence d'infliger à l'électricité une "double taxation" dans la mesure où celle-ci supporte déjà l'imposition d'un quota sur ses émissions de CO₂. En outre, Karadeloglou (1992), Jorgenson et Wilcoxon (1993), mais aussi Bossier et Bréchet (1993) pour la Belgique, ont montré qu'une taxation assise exclusivement sur le contenu énergétique avait un impact très faible sur les émissions de CO₂ des ménages. Ces deux raisons justifient l'introduction d'une taxe CO₂ pure sur les ménages plutôt qu'une taxe énergie ou une taxe mixte lorsque l'objectif est la réduction des émissions (première variante). La seconde variante teste les impacts d'une hausse de la TVA sur les produits énergétiques telle que la recette budgétaire soit identique : cette mesure offre l'avantage d'être plus facilement applicable qu'une taxe CO₂ et, en cela, son efficacité mérite d'être évaluée.

*Options de redéploiement
fiscal : allègements
uniformes et ciblés des CSE*

Dans les deux cas, la marge budgétaire ainsi dégagée est ré-injectée dans l'économie en réduction de cotisations sociales employeurs. Le choix de cette mesure se justifie par ses propriétés et par la recherche d'un "double dividende" (d'après la dénomination originale de Pearce, 1991), c'est-à-dire l'amélioration conjointe de la situation de l'emploi et de l'environnement (voir Bossier et Bréchet, 1995). La réduction de CSE est réalisée, dans un premier temps, sur l'ensemble des salariés car c'est la formule qui offre l'impact le plus positif sur le PIB. La mesure est également ciblée sur les bas salaires dans le scénario de taxe CO₂ pour maximiser les effets positifs sur l'emploi. Ces deux simulations sont effectuées sous la contrainte d'une neutralité budgétaire *ex post* qui assure que l'ensemble des recettes budgétaires reste inchangé par rapport à la situation de référence.

Les résultats macro-sectoriels des simulations sont présentés dans le tableau 8, les résultats pour les émissions de gaz à effet de serre dans le tableau 9, les achats et ventes de permis dans le tableau 10.

TABLEAU 8 - Permis négociables et mesures fiscales : résultats macroéconomiques
(différences en % par rapport à l'équilibre de référence)

	Variante de référence	Taxe CO ₂ sur les ménages + réduction uniforme des CSE	Taxe CO ₂ sur les ménages + réduction ciblée des CSE	Hausse de la TVA sur l'énergie + réduction uniforme des CSE
PIB	-0,34	-0,20	-0,50	-0,47
Consommation privée	-0,82	-0,89	-0,77	-1,14
Investissement privé	0,15	0,11	-0,53	-0,12
Consommation publique	-0,32	0,00	0,00	0,00
Demande finale intérieure	-0,57	-0,54	-0,55	-0,72
Exportations	-0,33	-0,21	-0,59	-0,39
Importations	-0,55	-0,57	-0,69	-0,59
Prix à la consommation	0,78	1,01	1,12	1,29
Salaire réel	-0,77	-1,00	-1,51	-1,28
Prix des importations	0,00	0,00	0,00	0,00
Prix des exportations	0,35	0,20	0,56	0,39
Prix de l'investissement	-0,32	-0,40	0,03	-0,24
Prix de production	0,77	0,61	0,94	0,81
Taux d'intérêt (<i>diff. en pt de %</i>)	-0,20	-0,19	-0,10	-0,16
Emploi total	-0,34	-0,09	0,31	-0,13
Revenu disponible réel	-1,12	-1,09	-1,08	-1,39
Résultats sectoriels				
Emploi				
- bas salaires	-0,30	-0,04	3,56	-0,07
- autres salaires	-0,35	-0,10	-0,45	-0,14
- secteurs énergétiques	-2,26	-2,98	-2,77	-2,77
- biens intermédiaires	-1,07	-0,89	-1,38	-1,11
- autres industries	-0,27	-0,06	0,20	-0,13
- services marchands	-0,27	0,02	0,53	0,00
Production				
- secteurs énergétiques	-2,27	-2,91	-2,94	-2,82
- biens intermédiaires	-1,25	-1,13	-1,71	-1,38
- autres industries	0,04	0,14	-0,20	-0,03
- services marchands	-0,34	-0,16	-0,11	-0,27
Prix de production				
- secteurs énergétiques	9,17	8,96	8,94	9,41
- biens intermédiaires	1,29	1,22	1,75	1,43
- autres industries	-0,44	-0,54	0,05	-0,34
- services marchands	0,32	0,06	0,03	0,20
Exportations				
- secteurs énergétiques	-1,31	-1,27	-1,28	-1,34
- biens intermédiaires	-1,86	-1,76	-2,51	-2,06
- autres industries	0,38	0,47	-0,04	0,29
- services marchands	-0,21	-0,04	-0,02	-0,13

Les impacts macro-sectoriels

Quelle que soit la mesure considérée, on constate d'emblée que les impacts récessifs provoqués par l'imposition des quotas dans les secteurs productifs subsistent : malgré l'allègement des charges patronales sur le facteur travail, la hausse des coûts de production demeure substantielle et le volume de la production globale réduit par rapport à l'équilibre de référence.

L'introduction d'une taxe sur le CO₂ sur les ménages ou l'élévation de la TVA sur l'énergie se traduisent en outre par une élévation mécanique du niveau des prix à la consommation (hausse supérieure à 1 % contre 0,78 % en l'absence de taxe) et une ponction de revenu réel. L'arbitrage consommation - loisir est influencé par cette réduction du revenu disponible réel des ménages mais la demande de travail, de son côté, est renforcée par l'allègement des cotisations patronales. Au total, l'effet négatif sur le volume de travail est réduit de manière plus ou moins nette selon la variante.

Bien qu'elle les réduise sensiblement, la réduction généralisée des cotisations patronales ne permet pas de neutraliser les pertes d'emploi (-0,09 % avec financement par la taxe CO₂ et -0,13 % avec financement par la TVA). Par contre, la réduction ciblée sur les bas salaires permet d'obtenir un double dividende (hausse du volume de travail de 0,31 %), mais exclusivement imputable aux bas salaires, le volume de travail des autres salariés diminuant de 0,45 %, soit davantage que dans la variante de référence. Du point de vue sectoriel, la réduction uniforme des cotisations améliore la situation de l'emploi dans tous les secteurs, hormis les secteurs énergétiques ; la réduction ciblée favorise nettement les services marchands, mais aussi les autres industries. Ceci provient du fait que la réduction du taux d'intérêt soit moins sensible dans cette dernière simulation, ce qui défavorise, en termes relatifs, la formation de capital.

En termes d'activité, la physionomie des résultats est partiellement différente : c'est l'impact des mesures fiscales sur les exportations qui joue un rôle clé. Les simulations révèlent que la perte de compétitivité n'est jamais récupérée, quelle que soit la modalité des réductions de charges. Le ciblage sur les bas salaires, en l'occurrence, accentue les pertes d'exportations. Il en résulte que la chute de production des secteurs exposés est renforcée tandis que la production des services marchands augmente.

Les impacts sur les émissions de gaz à effet de serre

Le niveau de la taxe CO₂ imputée aux ménages est calibré de manière à réduire leurs émissions de 10 % ; les émissions globales sont donc également réduites de 10 %. On peut noter que le repli de la demande de produits fossiles par les ménages permet au secteur énergétique de réduire davantage ses émissions. Ceci a comme conséquence arithmétique que les autres secteurs peuvent légèrement relever les leurs.

Si la réduction des émissions de N₂O est sensiblement renforcée par le comportement des ménages, ce n'est par contre pas le cas du CH₄ dont la majeure partie, en ce qui concerne les ménages, ne provient pas des consommations d'énergie. Le modèle confirme enfin que l'alourdissement de la TVA exerce un effet ténu sur les effluents : les émissions de CO₂ des ménages ne sont réduites que de 2,29 %, à peine plus que dans la variante de référence (dans laquelle aucune mesure n'est adressée aux ménages, mais où les secteurs producteurs d'énergie supportent les quotas d'émission), tandis que les émissions de CH₄ diminuent légèrement plus. Les secteurs énergétiques voient par ailleurs leurs émissions nettement moins réduites que dans le cas de la taxe CO₂.

TABLEAU 9 - Permis négociables et mesures fiscales : émissions de gaz à effet de serre
(différences en % par rapport à l'équilibre de référence)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total en équivalent CO ₂
Variante de référence				
Secteurs énergétiques	-6,37	-8,45	-10,67	-8,77
Biens intermédiaires	-13,42	-2,48	-0,84	-1,82
Autres industries	-12,95	-23,36	-16,69	-15,57
Services marchands	-9,64	-11,27	-10,97	-10,25
Ménages	-1,83	-0,40	-3,69	-2,28
Total	-8,04	-0,36	-2,33	-2,84
Taxe CO ₂ sur les ménages + réduction uniforme des CSE				
Secteurs énergétiques	-6,87	-9,12	-11,51	-9,46
Biens intermédiaires	-13,02	-2,32	-0,72	-1,67
Autres industries	-12,67	-23,03	-16,38	-15,27
Services marchands	-9,42	-11,02	-10,73	-10,02
Ménages	-10,00	-0,70	-10,51	-7,21
Total	-10,00	-0,45	-2,93	-3,48
Taxe CO ₂ sur les ménages + réduction ciblée des CSE				
Secteurs énergétiques	-6,86	-9,10	-11,49	-9,44
Biens intermédiaires	-13,11	-2,83	-1,30	-2,22
Autres industries	-12,47	-22,54	-16,08	-15,00
Services marchands	-9,43	-11,01	-10,72	-10,02
Ménages	-10,00	-0,59	-10,41	-7,11
Total	-10,00	-0,42	-3,15	-3,63
Hausse de TVA sur l'énergie + réduction uniforme des CSE				
Secteurs énergétiques	-6,05	-8,04	-10,14	-8,34
Biens intermédiaires	-13,56	-2,61	-0,98	-1,96
Autres industries	-13,05	-23,41	-16,78	-15,66
Services marchands	-9,88	-11,52	-11,22	-10,49
Ménages	-2,29	-0,13	-4,45	-2,65
Total	-8,12	-0,28	-2,44	-2,91

Exprimée en équivalent CO₂, la réduction d'émission des trois gaz est donc sensiblement renforcée avec la taxe sur le CO₂ (-3,48 % contre -2,84 %), contrairement au scénario de hausse de la TVA sur les produits énergétiques (-2,91 %). La réduction des émissions est toutefois influencée par la modalité de réduction des cotisations employeurs mise en oeuvre. Le ciblage sur l'emploi à bas salaires se traduit par une réduction plus prononcée : les émissions totales passent de -3,48 % à -3,63 %. L'analyse sectorielle des résultats révèle que ce mouvement est imputable au secteur des biens intermédiaires, gros émetteurs de gaz à effet de serre qui se trouve désavantagé par la réduction ciblée des CSE (chute plus importante de sa production). Cette réduction est surtout redevable au N₂O, gaz attaché aux processus industriels employés par ce secteur.

Les achats et les ventes de permis entre les secteurs

La physionomie des achats et ventes de permis d'émission n'est pas foncièrement altérée par les scénarios fiscaux testés ici. Deux secteurs restent inéluctablement vendeurs : les biens intermédiaires et les autres industries. Logiquement, les

achats du secteur producteur d'énergie non électrique sont sensiblement réduits lorsqu'une taxe CO₂ est introduite. Par contre, les achats effectués par les services marchands sont légèrement plus importants. Le prix du permis est réduit sensiblement lorsque la taxe CO₂ est introduite, ce qui montre que les secteurs productifs peuvent respecter leur quota global à un moindre coût marginal. Pour la TVA, c'est l'inverse qui apparaît en raison d'achats plus importants de la part des secteurs énergétiques.

TABLEAU 10 - Permis négociables et mesures fiscales : flux intersectoriels de permis
(en milliards de FB)

	Variante de référence	Taxe CO ₂ sur les ménages + réduction uniforme des CSE	Taxe CO ₂ sur les ménages + réduction ciblée des CSE	Hausse de la TVA sur l'énergie + réduction uniforme des CSE
Secteurs producteurs d'énergie :				
- énergie électrique	2,31	2,53	2,38	2,72
- énergie non électrique	2,46	1,23	1,26	2,65
Biens intermédiaires	-3,97	-3,46	-3,43	-4,14
Autres industries	-1,39	-1,23	-1,10	-1,43
Services marchands	0,58	0,92	0,88	0,20
Ensemble de l'économie	0,00	0,00	0,00	0,00
Prix du permis (FB/tCO ₂)	762,76	750,83	722,90	764,22

D. Permis négociables et mesures non fiscales

Le Programme national de réduction des émissions de CO₂, tel qu'il a été approuvé par la Conférence interministérielle de juin 1994, comporte un ensemble de mesures non fiscales, autrement dit d'actions à entreprendre par des mesures réglementaires (normes) ou incitatives (publicité, information) ne passant pas par les mécanismes de prix.

Évaluation de l'effet des mesures non fiscales par le modèle bottom up EPM

L'évaluation de l'impact de ces mesures sur les émissions de CO₂ a été effectuée par deux modèles technologiques pour la préparation du Programme national. La divergence des résultats, mise en évidence par Bossier *et al.* (1996), a amené une seconde évaluation, plus fine, à l'aide du modèle *bottom up* EPM. Cette évaluation repose sur deux hypothèses : une hypothèse de temps de retour maximal et une hypothèse d'absence de surcoût. Les réductions ainsi estimées tiennent lieu de potentiels économiques et peuvent être endogénéisées dans le modèle SPOT-E3¹.

Les mesures, telles qu'explicitées dans le Programme national, sont présentées dans le tableau 11.

L'évaluation de leur impact sur les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ par le modèle technologique EPM a nécessité d'éclater les 14 mesures en 33 options techniques élémentaires applicables dans les secteurs industriels et dans les services. Pour chacune de ces options, trois évaluations sont effectuées à l'horizon 2005 :

- évaluation du potentiel technique de réduction des consommations d'énergie : cette évaluation repose uniquement sur les technologies actuellement disponibles, mais sans hypothèse de rationalité économique (il n'est donc pas fait d'hypothèse sur l'apparition des techniques) ;
- évaluation du potentiel économique : parmi toutes les options techniques mises en évidence, ne sont retenues que celles qui vérifient une hypothèse de rationalité économique ; celle-ci est définie comme un temps de retour inférieur ou égal au tiers de la durée de vie de l'investissement dans le secteur tertiaire, et un temps de retour inférieur à 2,5 ans dans les secteurs industriels ;
- enfin, parmi les mesures économiquement rentables sur base du critère du temps de retour, ne sont retenues que celles qui n'offrent aucun surcoût significatif en matière d'investissement. Cette dernière condition justifie le fait que les mesures envisagées soient plus facilement acceptables du point de vue politique car elles n'occasionnent aucun coût supplémentaire par rapport aux projections de référence.

1. L'analyse économique des barrières à l'efficacité énergétique est une matière complexe et largement explorée par la littérature ; voir par exemple : Patterson (1996) ou Dessus (1991) ; pour l'interface entre économies d'énergie et fonctions de production, voir Blumstein-Stoft (1995) ou Stoft (1995).

TABLEAU 11 - Les mesures non fiscales du Programme national de réduction des émissions de CO₂
(source : Programme national, juin 1994)

Code mesure	Description
M1	Amélioration de l'isolation thermique des bâtiments neufs
M2	Utilisation accrue du gaz naturel, amélioration des performances des installations de chauffage et de production d'eau chaude
M3	Promotion de l'emploi d'appareils électro-ménagers et d'éclairage à haut rendement
M4	Découragement des systèmes de chauffage électrique direct
M5	Plans de transport personnel dans les entreprises
M6	Réduction de l'accès au centre ville des véhicules privés et des transports
M7	Autres mesures de promotion des transports en commun en milieu urbain
M8	Réduction du transport de marchandises par route
M9	Réduction des consommations de carburants des véhicules particuliers
M10	Surveillance accrue du respect des limitations de vitesse
M11	Audits et comptabilité énergétique
M12	Promotion des énergies renouvelables
M13	Plan d'équipement électrique
M14	Promotion de la cogénération

Préalable aux évaluations du modèle EPM, les projections de référence, qui ont également servi de cadrage macro-énergétique au Programme national, ont été réalisées avec le modèle macroéconométrique HERMÈS par Bossier, Bréchet, Mertens et Van Brusselen (1996). Les résultats en matière d'activité sectorielle et de prix (notamment de prix énergétiques) ont constitué la simulation de référence du modèle technologique EPM (voir Econotec, 1996). Ces scénarios exercent une influence directe sur le degré d'exploitation des potentiels techniques, essentiellement par l'entremise des prix énergétiques. Pour cette raison, deux scénarios alternatifs ont été retenus par Econotec :

- un scénario où les prix énergétiques, conformément à la projection de référence, demeurent stables sur la période 1995-2005 (scénario "Prix 95") ;
- un scénario où les prix énergétiques sont influencés par l'introduction d'une taxe CO₂/énergie équivalente à 10 dollars par baril en fin de période, soit une hausse du prix moyen de l'énergie de 13 % par rapport au scénario "Prix 95" (scénario "Taxe").

Seules les mesures concernant les secteurs productifs, hors production d'énergie, sont considérées ici. Ces données, agrégées dans la nomenclature du modèle SPOT-E3, sont exposées dans le tableau 12¹. Le tableau montre que, en valeur absolue, les économies d'énergie accessibles sont principalement regroupées dans les services marchands et les biens intermédiaires. En termes relatifs, toutefois, ce dernier secteur est celui qui abrite le plus de potentialités. Les mesures envisageables dans les secteurs énergétiques, données ici à titre indicatif, sont marginales. Le passage du scénario "Prix 95" au scénario "Taxe" montre que, pour l'ensemble des mesures considérées, la hausse des prix énergétiques provoque une réduction supplémentaire des consommations d'énergie de 15,1 %. Cet effet, légèrement plus prononcé dans les services marchands (+18,9 %), est sensiblement de la

1. L'ensemble des données désagrégées est présenté en annexe technique par Bréchet (1998b).

même ampleur dans les deux secteurs industriels (+11,2 % pour les biens intermédiaires et +12,8 % pour les autres industries).

TABLEAU 12 - Réductions effectives des consommations d'énergie liées aux mesures non fiscales
(source : Econotec (1996) et calculs propres)

Secteur	Scénario "Prix 95"		Scénario "Taxe"	
	en Ktep	en %	en Ktep	en %
Énergie	19,2	0,00	17,3	0,00
Biens intermédiaires	323,0	0,84	359,3	0,99
Autres industries	136,5	0,31	154,0	0,33
Services marchands	394,3	0,47	468,9	0,59

Endogénéisation des gisements d'économie d'énergie

La réduction des consommations intermédiaires énergétiques fournie par le modèle technologique EPM en fonction des deux scénarios de prix permet la construction d'une fonction linéaire qu'on estime vérifiée au voisinage des deux solutions observées. La réduction de consommation d'énergie pour le secteur j , notée QE^*_j , est donnée par une relation du type :

$$QE^*_j = - \left(\alpha_j + \beta_j \cdot \frac{P_{QE_j} - 1}{P_{QE_j}^{tax} - 1} \right) \cdot \overline{QE}_j$$

où P_{QE_j} est le prix des consommations intermédiaires d'énergie pour le secteur j (endogène), $P_{QE_j}^{tax}$ le prix des consommations intermédiaires d'énergie dans le scénario "Taxe" (exogène) et \overline{QE}_j le niveau des consommations énergétiques dans l'équilibre de référence. À l'équilibre de référence, P_{QE_j} est égal à l'unité. Les paramètres α_j et β_j sont calibrés à partir des données technologiques de manière à ce que :

α_j représente la réduction de consommation énergétique (exprimée en % par rapport à la consommation énergétique de base) dans le scénario "Prix 95", c'est-à-dire lorsque $P_{QE_j} = \overline{P_{QE_j}} = 1$;

β_j représente la réduction supplémentaire de consommation énergétique (en %) lorsque la hausse de prix est égale à celle retenue dans le scénario "Taxe", c'est-à-dire lorsque $P_{QE_j} = P_{QE_j}^{tax}$.

Par l'entremise de cette équation, l'exploitation des gisements d'économie d'énergie devient endogène ; elle est fonction de la hausse du prix des consommations intermédiaires énergétiques, elle-même inconnue *a priori* lorsqu'un système de permis est instauré. La hausse de prix de référence des consommations d'énergie (autrement dit $P_{QE_j}^{tax}$) est fournie dans le tableau 13.

TABLEAU 13 - Prix de référence des consommations d'énergie dans le scénario "Taxe"
(source : Econotec, 1996)

Secteur	$P_{QE_j}^{tax}$
Biens intermédiaires	1,201
Autres industries	1,131
Services marchands	1,102

La mise en oeuvre des mesures considérées peut s'opérer, par hypothèse, en l'absence de surcoût pour l'entreprise. Cette caractéristique permet de déterminer de manière endogène l'investissement correspondant sous contrainte que le coût de l'agrégat capital - énergie demeure inchangé par rapport à l'équilibre de référence. La réduction de consommation intermédiaire d'énergie QE_j^* est donc introduite dans la fonction de production avec une formation de capital K_j^* telle que la contrainte budgétaire suivante reste vérifiée :

$$PV_j \cdot V_j = PK \cdot (K_j + K_j^*) + P_{QE_j} \cdot (QE_j + QE_j^*)$$

où $K_j^* > 0$ et $QE_j^* < 0$.

Cette contrainte budgétaire permet d'obtenir K_j^* , connaissant QE_j^* , soit :

$$K_j^* = \frac{PV_j \cdot V_j - P_{QE_j} \cdot (QE_j + QE_j^*)}{PK} - K_j$$

En pratique, cette équation n'est utilisée qu'*ex ante* pour évaluer le capital nécessaire pour les réductions de consommation d'énergie. Elle perd de son intérêt *ex post* dans la mesure où, la contrainte budgétaire étant toujours vérifiée, le stock de capital s'ajuste automatiquement. Il n'est par contre plus possible de distinguer, au sein du stock de capital, celui redevable à la mise en place des mesures non fiscales.

Les demandes de facteurs sont enfin modifiées de la manière suivante, par exemple dans les secteurs industriels :

$$K_j = V_j \cdot \gamma_j^{(\sigma_{vj} - 1)} \cdot \left(\frac{\alpha_{V_j} \cdot PV_j}{PK} \right)^{\sigma_{vj}} + K_j^*$$

$$QE_j = V_j \cdot \gamma_j^{(\sigma_{vj} - 1)} \cdot \left(\frac{(1 - \alpha_{V_j}) \cdot PV_j}{P_{QE_j}} \right)^{\sigma_{vj}} + QE_j^*$$

où $K_j^* > 0$ et $QE_j^* < 0$.

Impacts de l'association des mesures non fiscales et des quotas d'émission

La mise en place des mesures non fiscales définies dans le Programme national va permettre aux entreprises de respecter une partie des quotas d'émission qui leur sont imposés sans accroissement de leur coût *ex ante*. Ceci exercera une influence sur le fonctionnement du marché des permis négociables et ses effets macrosectoriels en seront modifiés. La méthodologie mise au point permet, dans le voisinage des chiffrages technologiques fournis par le modèle *bottom up* EPM, d'exploiter de manière endogène les gisements d'économies d'énergie disponibles dans chaque secteur en fonction de l'évolution des prix énergétiques. La variante proposée ici combine l'exploitation endogène de ces gisements d'économie d'énergie avec l'imposition de quotas d'émission et instauration d'un système de permis négociables. Les quotas correspondent à une réduction des émissions de CO₂ de 10 % dans chaque secteur.

Le tableau 14 présente les résultats macroéconomiques, le tableau 15 les résultats sectoriels ; les flux intersectoriels de permis sont présentés dans le tableau 16. Dans chaque tableau, la première colonne rappelle les résultats de l'imposition d'un marché de permis avec quotas à -10 % sans mesure additionnelle.

Le modèle montre que la mise en oeuvre des mesures non fiscales allège de manière significative le coût de la réduction des émissions de CO₂. Cet effet résulte initialement de la moindre hausse des coûts de production, puis de la réduction des pertes de compétitivité et de pouvoir d'achat. L'exploitation des gisements d'économies d'énergie abaisse le coût marginal de réduction des émissions de CO₂, ce qui se reflète dans le prix du permis, inférieur de 8,3 % par rapport à la simulation de référence. La formation de capital, soutenue par les investissements nécessaires à la mise en oeuvre des technologies considérées, exerce toutefois une influence à la hausse sur le taux d'intérêt, influence qui minore ces effets positifs.

TABLEAU 14 - Mesures non fiscales et permis négociables : résultats macroéconomiques
(en % par rapport à l'équilibre de référence)

	Permis négociables seuls	Permis négociables + Mesures non fiscales
PIB	-0,34	-0,25
Consommation privée	-0,82	-0,66
Investissement privé	0,15	0,21
Consommation publique	-0,32	-0,29
Demande finale intérieure	-0,57	-0,45
Exportations	-0,33	-0,26
Importations	-0,55	-0,48
Prix à la consommation	0,78	0,65
Coût salarial (par tête)	0,00	-0,01
Salaire réel	-0,77	-0,65
Prix des importations	0,00	0,00
Prix des exportations	0,35	0,28
Prix de l'investissement	-0,32	-0,29
Prix de production	0,77	0,66
Taux d'intérêt (<i>diff. en point de %</i>)	-0,20	-0,17
Emploi total	-0,34	-0,21
Revenu disponible réel	-1,12	-0,88

Certains secteurs bénéficient davantage des effets positifs des mesures non fiscales, à la fois compte tenu des gisements disponibles (se reporter aux chiffrages *bottom-up*) et des mécanismes induits, notamment en matière de taux d'intérêt. À cet égard, le secteur des autres industries voit les effets positifs des mesures non fiscales quasiment neutralisés par la hausse du taux d'intérêt (le prix de production se réduit moins). Par contre, les biens intermédiaires, mais surtout les services marchands voient leur situation nettement améliorée. La chute de la production et les pertes d'emploi sont réduites de moitié dans ce dernier secteur.

Les flux d'achat et de vente de permis ne sont pas foncièrement affectés par les mesures non fiscales. Les secteurs énergétiques, qui ne bénéficient pas de ces mesures, demeurent les plus gros acheteurs de permis. Par contre, le volume d'achat des services marchands est nettement augmenté (il passe de 0,58 milliards à 1,02 milliards de FB). Le prix d'équilibre du permis atteint le prix plancher de 699 FB par tonne de CO₂, contre 762 FB en l'absence de mesures non fiscales, ce qui reflète une nette diminution du coût marginal de réduction des émissions.

TABLEAU 15 - Mesures non fiscales et permis négociables : résultats sectoriels
(en % par rapport à l'équilibre de référence)

	Permis négociables seuls	Permis négociables + Mesures non fiscales
Emploi		
- bas salaires	-0,30	-0,17
- autres salaires	-0,35	-0,23
- secteur énergétique	-2,26	-2,37
- biens intermédiaires	-1,07	-0,86
- autres industries	-0,27	-0,21
- services marchands	-0,27	-0,12
Production		
- énergie	-2,27	-2,56
- biens intermédiaires	-1,25	-1,00
- autres industries	0,04	0,07
- services marchands	-0,34	-0,15
Prix de production		
- secteur énergétique	9,17	8,23
- biens intermédiaires	1,29	1,05
- autres industries	-0,44	-0,40
- services marchands	0,32	0,26
Exportations		
- secteur énergétique	-1,31	-1,18
- biens intermédiaires	-1,86	-1,52
- autres industries	0,38	0,35
- services marchands	-0,21	-0,17
Importations		
- secteur énergétique	-3,79	-3,96
- biens intermédiaires	-0,42	-0,29
- autres industries	-0,32	-0,24
- services marchands	-0,21	-0,14
Consommation privée		
- bas salaires	-1,22	-0,95
- autres salaires	-0,76	-0,62
Investissement privé		
- secteur énergétique	-1,56	-1,75
- biens intermédiaires	-0,81	-0,63
- autres industries	0,34	0,34
- services marchands	0,47	0,56

TABLEAU 16 - Mesures non fiscales et permis négociables : flux intersectoriels de permis
(en milliards de FB)

	Permis négociables seuls	Permis négociables + Mesures non fiscales
Secteurs producteurs d'énergie :		
- énergie électrique	2,31	1,17
- énergie non électrique	2,46	2,31
Biens intermédiaires	-3,97	-3,50
Autres industries	-1,38	-0,99
Services marchands	0,58	1,02
Ensemble de l'économie	0,00	0,00
Prix du permis (kFB/tCO ₂)	762,76	699,63



Conclusion

Les permis d'émission négociables suscitent en Europe un intérêt soudain depuis l'adoption du Protocole de Kyoto en décembre 1997. La question de leur contribution aux politiques de lutte contre le changement climatique est dorénavant moins à l'ordre du jour que l'analyse de leurs mécanismes et impacts économiques. Le modèle d'équilibre général SPOT-E3 de l'économie belge vise explicitement à apporter des éléments d'évaluation des effets macro-sectoriels de cet instrument à long terme. Plus précisément, en opposition aux modèles d'équilibre partiel ou aux modèles technologiques, le modèle SPOT-E3 permet l'intégration des permis négociables au sein du système économique, l'analyse des interactions avec les instruments fiscaux et l'évaluation des impacts sur les principaux indicateurs macroéconomiques et sectoriels. Le modèle permet une évaluation à long terme des impacts macro-sectoriels des politiques visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et combinant mesures fiscales, permis négociables et nouvelles technologies. La nature du modèle implique cependant que ses diagnostics doivent être interprétés comme indicatifs des mouvements structurels de l'économie : les effets évalués sont pertinents du point de vue de l'analyse des mécanismes mis en évidence, pas pour la nature prédictive des chiffres (comme le ferait un modèle économétrique).

L'analyse des avantages et limites des permis négociables a montré, sur base d'une littérature abondante et en croissance exponentielle, que l'instrument n'est pas sans soulever de nombreuses difficultés pratiques de mise en oeuvre, caractère accentué par la grande diversité des options envisageables (assiette des permis, règles de dotation, agents impliqués, durée de vie...). L'intérêt des permis négociables demeure néanmoins qu'ils assurent la minimisation du coût de la réduction des émissions en alliant flexibilité et efficacité environnementale. Le ciblage du système sur certains agents spécifiques apparaît alors nécessaire au bon fonctionnement et à l'efficacité du marché. Ce ciblage n'est pas nécessairement à effectuer uniquement sur base du degré de pollution de l'entreprise ou de sa taille ; le système incite davantage à inclure les entreprises ayant des structures de coût marginal de réduction des émissions très différentes ("les pollueurs efficaces"), avec un niveau d'émission élevé.

Les permis négociables ne doivent pas être présentés comme concurrents aux propositions de taxation de l'énergie et/ou du carbone. Une généralisation des permis à l'ensemble des acteurs privés d'une économie (y compris les consommateurs) serait à la fois peu réaliste du point de vue pratique et peu efficace (importance des coûts de transaction, complexité du système,...) : le choix de l'instrument doit être effectué en tenant compte des caractéristiques intrinsèques des acteurs visés : la complémentarité des différents instruments disponibles doit être utilisée pour maximiser les impacts environnementaux et minimiser les coûts économiques. Enfin, il faut tenir compte du fait que, par rapport à un instrument

fiscal, les permis n'impliquent de recette budgétaire que dans certaines modalités spécifiques (vente ou mise aux enchères).

Les simulations effectuées dans cette étude ont montré que, instaurés dans les services et l'industrie, les permis permettent une réduction des émissions de gaz à effet de serre avec effet récessif faible. Le modèle révèle à quel point les mécanismes sectoriels jouent un rôle de toute première importance dans le profilage des effets macroéconomiques à travers, notamment, le choix des dotations initiales et les mécanismes d'achat et de vente de permis. Dans le cas de dotation initiale uniforme entre les secteurs, et pour une réduction des émissions de CO₂ de 10 % par rapport au niveau actuel, les secteurs des services marchands et les secteurs producteurs d'énergie apparaissent acheteurs nets de permis. Le coût marginal de réduction des émissions semble ainsi nettement plus élevé dans les secteurs protégés que dans les secteurs exposés. En tant que petite économie ouverte, la Belgique est relativement sensible aux conditions de fonctionnement d'un marché de permis international, et les simulations montrent que cette sensibilité pourrait aisément se traduire par un avantage net par rapport à une politique autarcique. Ce résultat est tributaire des coûts marginaux de réduction des pays partenaires et des répercussions du système en terme de compétitivité. En matière de combinaison d'instruments fiscaux et de permis négociables, la recherche d'un double dividende s'est révélée fructueuse : une réduction des cotisations patronales financée par une taxe sur le carbone chez les ménages se traduit par une élévation du niveau global de l'emploi, à condition que la réduction de cotisation soit ciblée sur les travailleurs à bas salaires. Ces créations d'emplois demeurent toutefois le privilège des secteurs les moins intensifs en énergie (services marchands et industriels autres que les biens intermédiaires). Enfin, la forte incitation à l'innovation technologique que produit l'imposition des quotas d'émission incite à réévaluer l'importance stratégique des mesures non fiscales : le modèle montre que l'existence de gisements d'économie d'énergie sans sur-coût significatif facilite le respect des quotas d'émission et réduit d'un tiers le coût macroéconomique de la réduction d'émission (en l'absence d'autres mesures d'accompagnement).

L'ensemble de ces résultats demeure bien entendu sujet aux précautions d'usage. En premier lieu, une série de tests de sensibilité devrait être menée afin d'éprouver la fiabilité des résultats, c'est-à-dire leur sensibilité à l'incertitude attachée à certains coefficients. Par ailleurs, il faut bien garder à l'esprit le fait que le système de permis d'émission tel que simulé dans le modèle est assez éloigné des modalités d'application réelles éventuelles. Certaines modalités de mise en oeuvre sont susceptibles d'altérer sensiblement les conclusions mises en évidence ici : choix des agents intervenant sur le marché, comportement de l'État, type de gaz couvert par le permis, mise aux enchères ou allocation gratuite des permis, etc... Il est cependant clair que certaines de ces modalités peuvent parfaitement être simulées avec le modèle. De plus, néanmoins, certains phénomènes peuvent surgir dans la réalité alors qu'ils sont absents du modèle : coûts de transaction élevés, distorsions de concurrence sur le marché des permis, comportements d'optimisation intertemporels, incertitude. L'influence de ces différents mécanismes sur les résultats (quantitatifs et qualitatifs) est difficile à cerner *a priori*. Parmi ces caractéristiques, certaines pourraient être introduites dans le modèle (*cf. infra*), d'autres non. Les travaux réalisés pour cette étude, leurs limites ainsi que les conclusions mises en évidence incitent donc à des investigations supplémentaires.

En premier lieu, de nombreuses options de politique économique sont envisageables (notamment dans la combinaison entre permis négociables et mesures fiscales) et mériteraient d'être testées avec le modèle. Notamment, la dimension internationale devrait faire l'objet d'analyses approfondies pour connaître les courbes de coûts marginaux de réduction de nos principaux partenaires commerciaux et leurs réactions en matière de prix. La littérature consacrée à ce sujet s'étoffe régulièrement et devrait fournir matière à élaboration de *scenarii* d'environnement international.

En second lieu, certains développements méthodologiques devraient permettre d'affiner le diagnostic formulé par le modèle et d'accroître l'adéquation avec le contexte politique que constitue le Protocole de Kyoto et ses aboutissants, tout en gardant présent à l'esprit le fait que les permis d'émission ne constituent que l'un des trois mécanismes - actuellement indissociables - du Protocole. Trois pistes méritent une attention particulière. La dynamisation du modèle SPOT-E3 permettrait d'analyser les sentiers de transition d'un équilibre à l'autre et les mécanismes de diffusion. Le marché de permis d'émission pourrait alors être envisagé de manière dynamique (durée de vie limitée des permis, thésaurisation, mises en vente ou rachats ponctuels par l'État...). Une désagrégation plus poussée du modèle permettrait de mettre en évidence les secteurs industriels les plus pollués, mais également d'appréhender plus finement le comportement des services marchands dont on a vu qu'ils jouaient un rôle stratégique en apparaissant comme de gros acheteurs de permis. Enfin, la modélisation d'un marché de permis négociables sur les deux autres gaz considérés dans le modèle (le CH₄ et le N₂O) permettrait d'évaluer les effets d'un marché dont les permis seraient assis sur une agrégation des trois gaz sur base de leur potentiel de réchauffement global.

On aura constaté que les permis d'émission négociables, en tant qu'instrument de politique économique, soulèvent nombre de questions complexes. La nécessité de disposer d'outils d'évaluation adaptés s'impose donc afin d'éclairer à bon escient les choix de politique économique en matière de changement climatique.



Annexe : la résolution du modèle

Le modèle SPOT-E3 est résolu sous le logiciel IODE développé par le Bureau fédéral du Plan¹. Ce logiciel n'autorise pas l'imposition explicite de contraintes. La simulation du marché de permis négociables est donc réalisée à l'aide d'un programme externe rédigé en LEC (langage utilisé sous IODE). Ce programme exécute le processus de tâtonnement qui permet d'obtenir le prix d'équilibre du permis négociable, soit P_{PN} tel que $\sum_j F_j = 0$.

L'algorithme de Newton-Raphson est utilisé : il permet en effet une convergence quadratique plus rapide qu'un simple tâtonnement linéaire. En outre, la convergence est assurée à proximité de la solution $f(x) = 0$ par une méthode de *bracketing* (méthode de la bisection) plus sûre que l'algorithme de Newton-Raphson (voir Press *et al.*, 1992).

Considérons que la fonction $f(x)$ représente la somme des flux d'échange de permis négociables ; c'est la solution fournie par le modèle SPOT où x représente le prix du permis. La méthode de Newton-Raphson évalue la valeur de la fonction $f(x)$ et de sa dérivée première $f'(x)$ au point x pour déterminer la valeur de x à l'itération $i+1$:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$

La dérivée est approximée par :

$$f'(x) \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$

où h représente le pas du processus de convergence. Une fois la cible dépassée, c'est-à-dire dès que $f(x) < 0$, la convergence est assurée par la méthode de la bisection qui consiste à réduire de moitié l'intervalle entre x_{i-1} et x_i jusqu'au seuil de convergence fixé :

$$x_{i+1} = \frac{x_{i-1} + x_i}{2}$$

1. Le logiciel IODE et sa documentation sont disponibles gratuitement sur le site internet du Bureau fédéral du Plan à l'adresse suivante : <http://www.plan.be>

La convergence du système n'est malheureusement pas triviale dans la mesure où :

- la forme de la fonction représentative du modèle complet est inconnue (quelques expérimentations ont révélé que la fonction était non monotone) ;
- la valeur initiale du permis influence fortement la capacité de l'algorithme à trouver la solution correcte.

Au voisinage de la solution, toutefois, la méthodologie est généralement valide.



Références bibliographiques

- ABARE (1995), *Global climate change : Economic dimensions of a cooperative international policy response beyond 2000*, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics.
- Adams D. (1997), *Greenhouse gas controls : the future of tradeable permits*, Management Report, Financial Times Energy Publishing.
- Barde J.Ph. (1992), *Économie et politique de l'environnement*, Presses Universitaires de France, 2^{ème} édition, Paris.
- Beaumais O., Bréchet Th. (1995), "Ecotax, rational use of energy and CO₂ emissions : testing a mixed policy using the HERMÈS-MIDAS models", in : Boero G. and Silberston A. (eds), *Environmental Economics*, Proceedings of the CEEA Conference, Macmillan.
- Beaumais O. (1995), *Une réinterprétation des politiques de l'environnement par les modèles*, Thèse de Doctorat en Sciences Économiques, Université de Paris I.
- Blumstein C., Stoft S.E. (1995), "Technical efficiency, production functions and conservation supply curves", *Energy Policy*, Vol. 23, n° 9, pp. 765-768.
- Böhringer C., Harrison G.W., Rutherford T.F. (1998), "Sharing the burden of carbon abatement in the European Union", *Discussion Paper*, University of Stuttgart, Institute for Energy Economics.
- Bolin B. (1998), "The Kyoto negotiations on climate change : a science perspective", *Science*, Vol. 279, p. 330, janvier 1998.
- Borges A.M. (1986), "Applied general equilibrium models : an assessment of their usefulness for policy analysis", *OECD Economic Studies*, n° 7, pp. 7-43.
- Bossier F., De Rous R. (1992), "Economic effects of a carbon tax in Belgium", *Energy Economics*, Vol. 14, n° 1, pp. 33-41.
- Bossier F., Martens B., Strumelle P., van der Beken W. (1993), "HERMES : a macrosectoral model for the Belgian economy", in : Commission of the European Communities (ed), *HERMES : Harmonised Econometric Research for Modelling Economic Systems*, North-Holland.
- Bossier F., Bréchet Th. (1993), "Impact économique et efficacité d'une taxe graduelle sur l'énergie en Belgique", *Les Cahiers Économiques de Bruxelles*, n° 138, 2^{ième} trimestre 1993, pp. 151-184.
- Bossier F., Bréchet Th. (1995), "A fiscal reform for increasing employment and mitigating CO₂ emissions in Europe", *Energy Policy*, Vol. 23, n° 9, pp. 789-798.

- Bossier F., Bréchet Th., Mertens S., Van Brusselen (1996), *Évaluation de l'impact des mesures fiscales et non fiscales dans le Programme belge de réduction des émissions de CO₂*, Bureau fédéral du Plan, Étude réalisée pour les Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles.
- Bossier F., Bréchet Th., Gouzée N., Mertens S., Van Den Steen P., Willems S. (1996), "Politiques et mesures destinées à modifier les tendances des émissions anthropiques de gaz à effet de serre en Belgique", Planning Paper 76, Bureau fédéral du Plan.
- Burniaux J.M., Martin J.P., Nicoletti G., Oliveira Martins J. (1992), "GREEN - a multi-sector, multi-region general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions : a technical manual", *OECD Working Papers*, n° 116, Paris.
- Bracke I., Bréchet Th. (1997), "Consommation(s) et consommateur(s) : une modélisation à deux ménages dans un cadre d'équilibre général", Bureau fédéral du Plan, Direction Générale, note 5933/thb/8002.
- Bréchet Th. (1997), "Distribution de l'emploi sectoriel par niveau de salaire - une exploitation des données ONSS'94", Bureau fédéral du Plan, Direction Générale, note 5922/thb/7982.
- Bréchet Th. (1998a), "SPOT-E3 : un modèle d'équilibre général appliqué de l'économie belge - Manuel technique", Bureau fédéral du Plan, Direction Générale.
- Bréchet Th. (1998b), "Permis négociables et nouvelles technologies dans un modèle d'équilibre général appliqué", Bureau fédéral du Plan, Direction Générale.
- Chichilnisky G., Heal G. (1995), "Markets for tradeable CO₂ emission quotas : principles and practice", *OECD Working Papers*, n° 153, Paris.
- Cline W. R. (1992), *The economics of climate change*, Institute for International Economics, Washington D.C.
- Commissariat Général du Plan (1993), *L'économie face à l'écologie*, La Découverte, La Documentation française, Paris.
- Commission Européenne (1992), *Proposition de directive du Conseil instaurant une taxe sur les émissions de dioxyde de carbone et sur l'énergie*, COM (92) 226 final/2, 30 juin.
- Conrad K., Schmidt T. (1995), "National economic impacts of an EU environmental policy - an applied general equilibrium analysis", Discussion Paper, n° 95-22, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH, Mannheim.
- Dessus B. (1991), "Les réserves d'économie d'énergie : nature, caractéristiques et coûts d'accès", *Revue de l'Énergie*, n° 431, pp. 388-396.
- Dornbush R., Poterba J.M. (eds), (1992), *Global warming : economic policy response*, MIT Press, Londres.
- Econotec (1996), *Évaluation de l'impact des mesures fiscales et non fiscales prévues dans le Programme belge de réduction des émissions de CO₂ - approche bottom-up EPM*, Étude réalisée pour les Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles.

- Heister J., Michaelis P., Mohr E. (1992), "The use of tradeable emission permits for limiting CO₂ emissions", *European Economy*, Special Edition n° 1.
- Hope C., Anderson J., Wenman P. (1993), "Policy analysis of the greenhouse effect", *Energy Economics*, Vol. 21, n° 3, pp. 327-338.
- Jorgenson D.W., Wilcoxon P.J. (1993), "Reducing U.S. carbon dioxide emissions : an assessment of different instruments", *Journal of Policy Modeling*, Vol. 15, n° 5-6, pp. 491-520.
- Karadeloglou P. (1992), "Energy tax versus carbon tax : a quantitative macro-economic analysis with the Hermes-Midas models", *European Economy*, Special Edition, n° 1, pp. 153-184.
- Kerr S, Maré D. (1997), "Transaction costs and tradeable permit markets : the United States lead phasedown", Discussion Paper, University of Maryland.
- Kram T. (1993), *National energy options for reducing CO₂ emissions - Volume I : the international connection*, ETSAP - IEA, Netherlands Energy Research Foundation ECN, ECN-C-34-101.
- Kram T. (1994), *Boundaries of future carbon dioxide emission reduction in nine industrial countries*, ETSAP - IEA, Netherlands Energy Research Foundation ECN, ECN-C-94-025.
- Lenstra J. (1993), "The merits of mixed bags : national plans, agreements and policy instruments", OECD/IEA Conference on the Economics of Climate Change, Paris.
- Majocchi J. (1994), "Review of empirical models and results related to eco-taxes and employment effects", OECD Workshop on Implementation of Environmental Taxes, Paris.
- Matsuo N. (1998), "Key elements related to the emissions trading for the Kyoto Protocol", *Energy Policy*, Vol. 26, n° 3, pp. 263-273.
- McKibbin W.J., Wilcoxon P.J. (1992), "G-Cubed : a dynamic multi-sector general equilibrium model of the global economy", *Brookings Discussion Papers in International Economics*, n° 98.
- McKibbin W.J. et Wilcoxon P.J. (1995), "The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model", Brookings Institution, mimeo.
- Mertens S. (1997), "Module énergie du modèle Hermès : estimation des fonctions translog", Bureau fédéral du Plan, Direction Sectorielle.
- Mullins F., Baron R. (1997), "International GHG emission trading", Annex I Expert Group on the UN FCCC, "Policies and Measures for Common Action", Working Paper 9, OECD, Paris.
- Nordhaus W.D. (1991), "To slow or not to slow : the economics of the greenhouse effect", *Economic Journal*, Vol. 101, pp. 920-937.
- OECD (1994), *Managing the environment : the role of economic instruments*, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

- OECD (1995), *Global warming : economic dimensions and policy responses*, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- Parry I.W., Williams R.C., Goulder L.W. (1998), "When can carbon abatement policies increase welfare ? The fundamental role of distorted factor markets", Discussion Paper 97-18 REV, Resources for the Future.
- Patterson M.G. (1996), "What is energy efficiency ? Concepts, indicators and methodological issues", *Energy Policy*, Vol. 24, n° 5, pp. 377-390.
- Pearce D. (1991), "The role of carbon taxes in adjusting to global warming", *The Economic Journal*, Vol. 101, n° 407, pp. 938-948.
- Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. (1992), *Numerical recipes in C - the art of scientific computing*, Cambridge University Press, Seconde édition.
- Shogren J.F., Herriges J.A., Govindasamy R. (1993), "Limits to environmental bonds", *Ecological Economics*, n° 8, pp. 109-133.
- Stavins R.N. (1995), "Transaction costs and tradeable permits", *Journal of Environmental Economics and Management*, n° 29, pp. 133-148.
- Stoft S.E. (1995), "The economics of conserved-energy supply curves", *The Energy Journal*, Vol. 16, n° 4, pp. 109-137.
- Tietenberg T.H. (1990), "Economic instruments for environmental regulation", *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 6, n° 1, pp. 17-33.
- Tomkins J.M., Twomey J. (1994), "International pollution control : a review of marketable permits", *Journal of Environmental Management*, n° 41, pp. 39-47.
- Schelling T.C. (1992), "Some economics of global warming", *The American Economic Review*, Vol. 82, n° 1, pp. 1-14.
- United Nations (1997), Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties, Third Session, 1-10 December.
- Van der Mensgrugghe D. (1994), "GREEN : the reference manual", *OECD Working Papers*, n° 143, Paris.
- Vickrey W. (1992), "Theoretical and practical possibilities and limitations of a market mechanism approach to air pollution control", *Land Economics*, n° 68, pp. 1-6.
- Wiener J.B. (1997), "Designing markets for international greenhouse gas control", *RFF Climate Issues Brief #6*, Internet Edition, Resources For The Future.
- Wilson D., Swisher J. (1993), "Exploring the gap : top-down versus bottom-up analyses of the costs of mitigating global warming", *Energy Economics*, Vol. 21, n° 3, pp. 249-262.
- Zagamé P. (1993), "L'apport des modèles à l'évaluation économique des politiques d'environnement : le cas de la limitation des émissions de CO₂", in : *L'économie face à l'écologie*, Commissariat Général du Plan, La Documentation française, Paris.