

**GREEN : UN MODÈLE GLOBAL POUR CHIFFRER LES COÛTS DES MESURES  
DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>**

**Jean-Marc Burniaux, Giuseppe Nicoletti  
et Joaquim Oliveira-Martins**

**TABLE DES MATIÈRES**

Introduction . . . . .	56
I. Spécification du modèle . . . . .	58
A. Équilibre sur une seule période . . . . .	58
B. Éléments de la dynamique . . . . .	71
II. Déterminants des taxes sur le carbone dans le modèle <b>GREEN</b> . . . . .	75
III. Mesures du bien-être . . . . .	77
IV. Données . . . . .	79
V. Définition des paramètres . . . . .	81
A. Résultats de l'examen de la littérature . . . . .	<b>82</b>
B. Paramétrisation du modèle <b>GREEN</b> . . . . .	84
VI. Calibrage . . . . .	89
Conclusions . . . . .	93
Bibliographie . . . . .	98
Glossaire . . . . .	100

---

Les auteurs remercient tout particulièrement John P. Martin, qui a supervisé les différentes étapes de cette étude. David Grubb et Derek Blades ont formulé des commentaires très utiles sur les versions préliminaires. Les auteurs adressent aussi leurs remerciements à Laurent Moussiég, Isabelle Wanner et Christophe Complainville pour leur assistance statistique, et à Lyn Louichaoui et Brenda Livsey-Coates pour leur concours technique.

---

## INTRODUCTION

La modification du climat, principalement liée à l'augmentation des concentrations atmosphériques mondiales de gaz à effet de serre (GES), dont le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est le plus important du point de vue quantitatif, présente trois grandes caractéristiques. Tout d'abord, il s'agit d'un phénomène planétaire : les émissions de GES, quel que soit le pays d'origine, contribuent à accroître les concentrations mondiales. En second lieu, il est lié à l'activité économique, qui influence la demande d'énergie et l'épuisement des ressources : près de 75 pour cent des émissions anthropiques de  $\text{CO}_2$  proviennent de la combustion de combustibles fossiles non renouvelables. Enfin, il présente des dimensions temporelles importantes : l'accroissement des concentrations de GES devrait s'étendre sur une longue période et se traduire par des fluctuations dans le temps de la répartition régionale des émissions; son intensité dépendra de l'évolution future des sources d'énergie renouvelables « propres »; par ailleurs, les politiques d'adaptation et/ou de réduction des émissions impliquent toutes des coûts d'ajustement élevés et des réorientations marquées des courants d'échanges.

Ces caractéristiques justifient l'utilisation d'un modèle d'équilibre général appliqué dynamique et mondial pour l'analyse du problème des émissions de  $\text{CO}_2$ . Du fait qu'ils intègrent les décisions des ménages et des entreprises, les modèles d'équilibre général appliqué peuvent prendre en compte les mécanismes économiques qui relient dans chaque période la base de ressources disponibles aux émissions anthropiques de  $\text{CO}_2$ . De plus, les modèles mondiaux permettent de déterminer les contributions relatives de différentes régions du monde aux émissions totales de  $\text{CO}_2$  et de simuler les politiques destinées à réduire les émissions mondiales. De surcroît, les modèles dynamiques appréhendent l'évolution des émissions dans le temps en fonction du progrès technique et la rapidité de l'ajustement de l'économie mondiale aux variations des prix relatifs. Enfin, du fait qu'ils tiennent compte explicitement des effets de bien-être, les modèles d'équilibre général appliqué se prêtent bien à l'évaluation dans le temps des coûts régionaux et mondiaux des politiques de réduction des émissions.

Le Département des Affaires économiques de l'OCDE a construit un modèle mondial d'équilibre général appliqué et dynamique avec pour objectif de chiffrer les effets économiques des politiques destinées à réduire les émissions de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Il s'agit du modèle environnemental d'équilibre général (**GeneRal Equilibrium *EM*vironmental model**), ci-après désigné comme le modèle GREEN. Cet article vise à donner une vue d'ensemble non technique de la spécification, de la paramétrisation et du calibrage du modèle GREEN'. Il complète ainsi les autres articles de ce même numéro qui présentent les résultats de différentes simulations sur ce modèle.

Dans sa version actuelle, le modèle GREEN comprend 12 sous-modèles régionaux (4 pays/régions de l'OCDE et 8 régions hors OCDE), 11 secteurs de production, 4 secteurs de consommation et 15 facteurs primaires. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques de GREEN. Toutes les régions sont reliées entre elles par des flux commerciaux pour chacun des biens échangeables produits. Les flux commerciaux bilatéraux sont indiqués séparément pour chaque paire de régions dans la ventilation régionale mondiale.

Le modèle met en lumière les relations entre l'épuisement des combustibles fossiles, la production d'énergie, la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>. L'accent est donc mis sur le secteur énergétique et sur ses liens avec l'activité économique. On distingue trois sources d'énergie fossiles – pétrole, gaz naturel et charbon – et une source d'énergie non fossile, à savoir l'électricité. En outre, des sources d'énergie non conventionnelles – dites « technologies de recharge » – sont censées devenir disponibles au cours de la période considérée. Le bloc de production de chaque sous-modèle régional décrit de façon détaillée l'offre de combustibles fossiles et la consommation d'intrants énergétiques fossiles et non fossiles dans le processus productif. On tient compte également des changements dans la composition de la production en traitant l'agriculture comme un secteur séparé et en distinguant deux autres grands secteurs, les industries à forte intensité énergétique et les autres industries et services.

Dans sa version actuelle le modèle GREEN a une structure dynamique récursive simple, dans laquelle les décisions d'épargne affectent les résultats économiques futurs par le biais de l'accumulation de capital productif. Les décisions d'investissement des entreprises ne sont pas prises en compte et l'investissement est estimé par résidu. Le modèle fait intervenir les rigidités du marché des facteurs, ce qui implique une mobilité sectorielle (partielle) du capital et une distinction entre le « vieux » et le « nouveau » capital.

Le modèle GREEN présente plusieurs avantages sur d'autres modèles mondiaux conçus pour analyser le problème des émissions de dioxyde de carbone<sup>1</sup>. Tout d'abord, c'est le seul modèle mondial qui intègre des liaisons commerciales complètes entre toutes les régions du monde. Tous les autres modèles se fondent sur les hypothèses Heckscher-Ohlin pour simplifier les structures et les besoins de données<sup>3</sup>. En second lieu, comme il repose essentiellement sur des données entrées-sorties et des statistiques commerciales fournies par les différents pays, GREEN permet une ventilation régionale étendue et flexible, tout en conservant une précision suffisante au niveau sectoriel. Ces caractéristiques font que GREEN se prête particulièrement bien à l'analyse des problèmes de compétitivité internationale et à la simulation de différents types d'accords régionaux et internationaux visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. En outre, GREEN est le seul modèle mondial qui prend en compte de manière explicite les distorsions – notamment les taxes et les subventions – qui affectent les prix de l'énergie des différents pays. On peut ainsi analyser les conséquences pour le bien-être de ces distorsions et leur interaction avec la taxation du carbone. Enfin, GREEN est également le seul des modèles mondiaux à associer des liaisons commerciales mondiales complètes, des données régionales et sectorielles détaillées et diverses sources de coûts d'ajustement dans la production<sup>4</sup>.

Le modèle GREEN présente aussi d'importantes limites en ce qui concerne le traitement du changement climatique. Certaines sont communes à d'autres modèles mondiaux : le seul gaz à effet de serre étudié est le dioxyde de carbone; les avantages des mesures de réduction des émissions (les dommages évités imputables au réchauf-

fement planétaire) sont négligés; il n'est pas tenu compte des distorsions qui peuvent affecter l'offre de travail ou les décisions de consommation et d'épargne des ménages; enfin, le marché international du pétrole est présumé être parfaitement concurrentiel<sup>5</sup>. D'autres limites sont plus caractéristiques du modèle GREEN, notamment l'hypothèse selon laquelle les agents forment des anticipations statiques<sup>6</sup>. D'une manière générale, l'accent mis sur le dioxyde de carbone et l'exclusion des effets bénéfiques tendent à amplifier les coûts des politiques visant à réduire les émissions. Mais il est difficile de prédire dans quelle mesure les autres limitations peuvent affecter les résultats des simulations.

A l'heure actuelle on fait tourner le modèle GREEN sur la période 1985-2050, en cinq étapes espacées de cinq ans, jusqu'à 2010, suivies de deux étapes espacées de vingt ans. Dans chaque région, le modèle de base est calibré sur les taux de croissance exogènes du PIB et de la population et sur le progrès technique neutre dans l'utilisation de l'énergie. Étant donné la structure récursive du modèle GREEN, l'évolution dans le temps de l'économie peut être décrite comme une séquence d'équilibres temporaires statiques.

## I. SPÉCIFICATION DU MODÈLE

### A. Équilibre sur une seule période

#### 1. Producteurs

Le bloc de la production comprend 11 secteurs (voir tableau 1)<sup>7</sup>. Cinq d'entre eux – charbonnages, pétrole brut, gaz naturel, produits pétroliers raffinés et distribution d'électricité, de gaz et d'eau – concernent l'offre et la distribution de sources d'énergie conventionnelles. Trois autres secteurs énergétiques décrivent l'offre de sources d'énergie non conventionnelles. Les trois secteurs restants – agriculture, industries à forte intensité énergétique et autres industries et services – couvrent la production de biens et de services.

Chacune des quatre sources primaires d'énergie – charbon, pétrole, gaz naturel et électricité – peut être remplacée à une date future par des technologies de rechange, qui sont censées être disponibles sur le marché à l'avenir. Dans le modèle GREEN, ces technologies sont définies par deux caractéristiques principales : *i*) elles deviennent disponibles au même instant dans toutes les régions; *ii*) leurs prix sont exogènes et identiques dans toutes les régions. Dans le cadre d'équilibre général qui est celui de GREEN, l'offre de technologies de rechange est donc infinie. Pour chacun des trois combustibles fossiles, on suppose qu'il existe deux sources de remplacement : *a*) une technologie fondée sur le carbone, qui produit un combustible de synthèse à teneur en carbone plus élevée que la source conventionnelle; *b*) un combustible de remplacement sans carbone. La première source est un combustible de synthèse liquide dérivé du charbon ou du schiste bitumineux, la seconde est un combustible liquide dérivé par exemple de la biomasse. Une seule technologie de remplacement sans carbone est disponible pour la production d'électricité. Cette option représente toutes les sources

Tableau 1. **Nomenclature géographique et sectorielle du modèle GREEN**

Secteurs de production	Secteurs de consommation
1) Agriculture	1) Produits alimentaires, boissons et tabacs
2) Charbonnages	2) Combustibles et électricité
3) Pétrole brut	3) Transports et communications
4) Gaz naturel	4) Autres biens et services
5) Pétrole raffiné	
6) Distribution d'électricité, gaz et d'eau	
7) Industries à forte intensité énergétique	
8) Autres industries et services	
9) Energie de rechange à base de carbone <sup>1</sup>	
10) Source de rechange sans carbone <sup>2</sup>	
11) Source d'électricité de rechange sans carbone <sup>3</sup>	
Régions	Facteurs primaires
1) États-Unis	1) Travail
2) Japon	2) « Vieux » capital, par secteur
3) CE	3) « Nouveau » capital
4) Autres régions de l'OCDE <sup>4</sup>	4) Facteurs fixes sectoriels pour chaque combustible
5) Europe centrale et orientale (PECO) <sup>5</sup>	5) Terre, agriculture
6) Ex-Union soviétique	
7) PVD exportateurs de pétrole <sup>6</sup>	
8) Chine	
9) Inde	
10) Économies dynamiques d'Asie (EDA) <sup>7</sup>	
11) Brésil	
12) Reste du Monde (RdM)	

1. Combustible liquide de synthèse dérivé du charbon ou des schistes bitumineux.
2. Combustible liquide sans carbone (tiré par exemple de la biomasse).
3. Électricité sans carbone à l'exclusion de l'hydro-électricité et de la fission nucléaire (fusion nucléaire, énergie solaire, énergie éolienne, etc.).
4. Australie, Canada, Nouvelle-Zélande, AELE (sauf Suisse et Islande) et Turquie.
5. Bulgarie, Tchécoslovaquie, Hongrie, Pologne, Roumanie et Yougoslavie.
6. Ce groupe comprend les pays de l'OPEP et d'autres pays exportateurs de pétrole, de gaz naturel et de charbon. Pour une liste complète, voir tableau 4 dans Burniaux *et al* (1992a).
7. Hong-Kong, Philippines, Singapour, Corée du Sud, Taiwan et Thaïlande.

d'électricité à l'exclusion de l'hydro-électricité et de la fission (fusion nucléaire, énergie solaire ou énergie éolienne, etc). Les options de rechange à base de carbone et exemptes de carbone sont identiques pour le charbon, le pétrole et le gaz naturel.

Dans chaque secteur conventionnel, la production brute est obtenue à l'aide des quatre sources primaires ou des sources de remplacement correspondantes, de produits pétroliers raffinés, d'un facteur fixe (la terre, un combustible fossile ou une ressource exempte de carbone), de capital, de main-d'œuvre et de biens et services intermédiaires<sup>8</sup>. Étant donné la structure dynamique de GREEN, durant chaque période coexistent deux catégories de biens d'équipement : le « vieux » capital, qui avait été installé dans les périodes précédentes, et le « nouveau » capital, qui résulte d'investissements dans la période en cours. Enfin, on présume que l'énergie conventionnelle et les intrants intermédiaires peuvent être obtenus à partir de fournisseurs

nationaux ou étrangers. Les énergies de rechange sont obtenues à l'aide de capital, de main-d'œuvre et d'un facteur spécifique dont l'offre est supposée infinie. Etant donné que dans ce modèle le travail et le capital ne sont pas mobiles d'un pays à l'autre, les coûts marginaux de ces produits de remplacement varient en général selon les régions. La différence entre les coûts marginaux et les prix exogènes de ces produits est imputée au facteur fixe spécifique et affectée dans chaque région aux consumma-

#### Encadré 1

### OFFRE DE FACTEURS PRIMAIRES DANS LE MODÈLE GREEN

Dans chaque période, l'offre de facteurs primaires est normalement fixée à l'avance, et l'on présume qu'il existe un décalage entre l'investissement et l'installation des équipements. Il y a cependant d'importantes exceptions. D'une part, si l'offre de capital neuf est prédéterminée, l'offre de capital ancien dans chaque secteur est partiellement tributaire de sa valeur locative. La structure des marchés d'équipement d'occasion est décrite dans l'encadré 2. D'autre part, la terre, la source d'électricité conventionnelle exempte de carbone, le pétrole brut, le gaz naturel et le charbon sont tous supposés sensibles à leurs prix courants.

La pente positive de la courbe d'offre de la terre reflète la possibilité de remettre en production les terres marginales. Une sensibilité-prix directe finie de la ressource d'électricité sans carbone exprime de manière approximative les coûts d'ajustement liés aux délais de construction dans le secteur nucléaire. Les courbes d'offre du pétrole et du gaz tiennent compte des pressions dues aux coûts d'extraction. Enfin, l'élasticité-prix du charbon est supposée finie mais de valeur élevée.

Pour certains de ces facteurs – la terre, la ressource exempte de carbone et le charbon – on suppose que dans chaque période la sensibilité-prix de l'offre varie selon que la demande est supérieure ou inférieure à l'offre du facteur fixe dans la période précédente. Par conséquent, des élasticités-prix de l'offre à la hausse et à la baisse sont définies pour ces facteurs. Ce comportement asymétrique des prix reflète l'hypothèse suivant laquelle l'expansion ou la contraction de l'offre de ces facteurs ne présentent pas la même souplesse. Les élasticités de l'offre à la hausse et à la baisse font l'objet d'une analyse détaillée dans la section V.B.

Pour le pétrole brut et le gaz, on peut distinguer deux indicateurs de l'offre : l'offre potentielle, déterminée par le stock de ressources exploitables et par d'autres facteurs technologiques, et l'offre effective, qui est déterminée par la courbe de l'offre du facteur fixe et limitée par l'offre potentielle. A un moment quelconque, les producteurs de gaz et de pétrole des pays en développement exportateurs d'énergie peuvent faire des livraisons inférieures à la production potentielle aux prix du marché donnés. Pour plus de commodité, on suppose que les producteurs de pétrole des autres régions ont une offre toujours égale à la production potentielle.

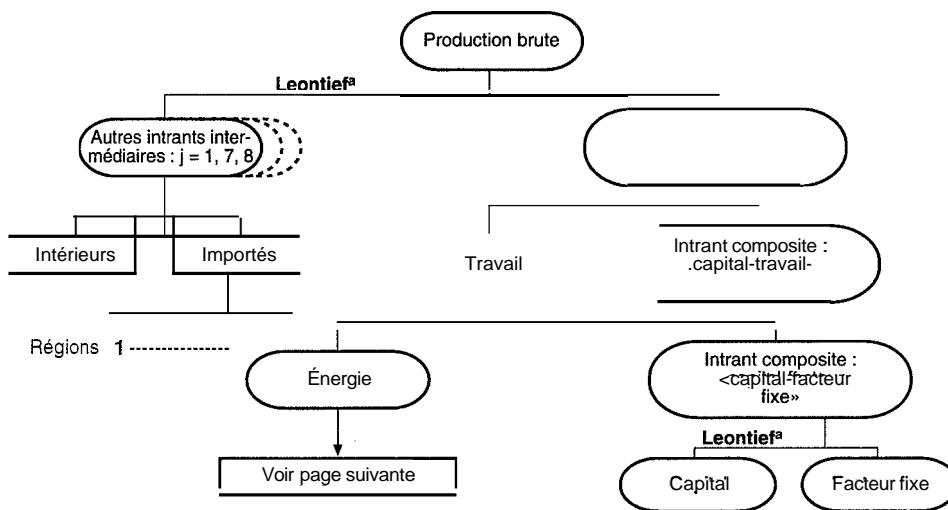
A terme, l'offre potentielle de combustibles fossiles est présumée dépendre de l'épuisement des ressources. Tandis que les réserves de charbon sont supposées être infinies, les approvisionnements en pétrole brut et en gaz naturel sont décrits par un sous-modèle d'épuisement des ressources, qui fait partie intégrante de la structure dynamique du modèle. Le sous-modèle d'épuisement prévoit une certaine sensibilité-prix de l'offre potentielle, ou bien des ressources restant à découvrir (voir section I.B.I).

teurs nationaux. Étant donné que les prix sont par hypothèse identiques d'un pays à l'autre, les énergies de rechange ne sont pas échangées<sup>9</sup>. L'offre de facteurs primaires est décrite dans l'encadré 1.

Tous les secteurs fonctionnent avec des rendements d'échelle constants et présentent une structure de production commune (graphiques 1a et 1b). Pour tous les intrants, les producteurs choisissent des quantités optimales de manière à minimiser leurs coûts de production, eu égard au niveau de la demande sectorielle et des prix relatifs après impôt. Des hypothèses simplificatrices concernant la technologie disponible permettent de distinguer plusieurs étapes dans les décisions des producteurs<sup>10</sup>. Ceux-ci déterminent d'abord la part respective des produits intermédiaires et d'un intrant composite comprenant tous les facteurs primaires (capital, travail et facteur fixe) et l'énergie. Dans un second temps cet intrant composite est subdivisé entre le travail et les autres facteurs primaires. Troisièmement, les producteurs choisissent les proportions respectives de l'énergie et du couple capital/facteur fixe. Quatrièmement, l'agrégat énergie est ventilé entre le charbon, le pétrole, le gaz, les produits pétroliers raffinés et l'électricité. Cinquièmement, la répartition optimale entre technologies classiques et technologies de rechange est déterminée pour chacune de ces sources d'énergie. Sixièmement, les producteurs déterminent le dosage capital/facteur fixe. Enfin, la demande de produits intermédiaires et énergétiques échangés est répartie entre offre intérieure et importations.

Il importe de noter que, contrairement à ce qui est le cas dans les autres modèles mondiaux d'équilibre général appliqué, la structure d'emboîtement des hypothèses dans le modèle GREEN est conçue de telle sorte que l'énergie est d'abord couplée

Graphique 1a. Structure de la production dans le modèle GREEN



a. Leontief : coefficients fixes.  
 b. CES : élasticité constante de substitution.

