

Annexe 2

Aperçu du modèle de l'OCDE ENV-Linkages

A2.1. Introduction

Le modèle d'équilibre général de l'OCDE ENV-Linkages est le successeur du modèle GREEN de l'OCDE pour les études environnementales, qui a été initialement développé par le Département des affaires économiques de l'OCDE (Burniaux, *et al.*, 1992) et que la Direction de l'environnement de l'OCDE a maintenant en charge. GREEN a été utilisé au départ pour étudier les mesures d'atténuation du changement climatique ; sa version la plus élaborée est commentée dans Burniaux (2000). Le modèle GREEN a ensuite été modifié pour devenir le modèle Linkages, puis la plate-forme de modélisation JOBS/Polestar, qui a été utilisée pour établir les Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2020. Une version de ce modèle est également utilisée à l'heure actuelle à la Banque mondiale pour les recherches concernant les questions économiques mondiales de développement. Le modèle a été utilisé précédemment pour établir un scénario de référence jusqu'en 2030 et pour étudier les conséquences du changement structurel (y compris sous l'angle de certains impacts environnementaux) lié à la croissance économique. Une grande partie des travaux d'application du modèle est présentée dans différents chapitres des *Perspectives de l'environnement à l'horizon 2030* (2008). En ce qui concerne les caractéristiques du modèle et les résultats d'analyses de sensibilité, on pourra se reporter à OCDE (2006).

Cette annexe, qui donne une description synthétique du modèle ENV-Linkages sans entrer dans tous les détails, s'articule comme suit. La section A2.2 introduit le modèle et examine brièvement ses principales caractéristiques, ses évolutions récentes et les instruments de politique climatique qui peuvent faire l'objet d'une simulation. La section A2.3 rend compte de la structure du modèle et commente ses principales équations. Enfin, la section A2.4 expose la méthode de calibrage, tout d'abord pour ajuster le modèle aux données de l'année de référence, puis pour produire de façon dynamique une projection de référence des émissions.

A2.2. Brève présentation du modèle ENV-Linkages

A2.2.1. Principales caractéristiques

Le modèle ENV-Linkages est un modèle récuratif néo-classique d'équilibre général dynamique. C'est un modèle économique mondial qui se fonde essentiellement sur une base de données économiques nationales. Dans la version du modèle qui a été utilisée pour cet ouvrage, le modèle représente l'économie mondiale en 12 pays/régions, comportant chaque fois 25 secteurs économiques (tableaux A2.1 et A2.2), dont cinq technologies différentes pour la production d'électricité (fossile, nucléaire, hydroélectricité, éolien et solaire, et combustibles renouvelables et déchets). Pour chacune des douze régions, un tableau économique d'entrées/sorties a été élaboré (il provient généralement des instituts nationaux de la statistique). La base de données a été constituée et gérée à l'Université Purdue par le consortium du Global Trade Analysis Project (GTAP). On trouvera une description plus détaillée de cette base de données dans Dimaranan (2006). Ces tableaux identifient tous les intrants d'un secteur et toutes les branches d'activité acquérant certains produits.

Dans le modèle ENV-Linkages, toute la production est censée être réalisée dans des conditions de minimisation des coûts et sous l'hypothèse de marchés parfaits et de rendements d'échelle constants de la technologie. La technologie de production est spécifiée sous la forme de fonctions de production CES imbriquées avec hiérarchisation par branche. Le niveau supérieur de la fonction de production combine donc la valeur ajoutée et le composite regroupant l'ensemble des intrants intermédiaires, d'une part, et, d'autre part, les gaz à effet de serre (GES) autres que le CO₂ dans les secteurs qui émettent ces gaz comme coproduits (voir ci-après). Cette structure est répétée pour chaque production, la paramétrisation des fonctions CES pouvant varier d'un secteur à l'autre. Pour les technologies de production d'électricité à partir de combustibles non fossiles, le composite « autres intrants » est légèrement différent en ce sens

que le niveau supérieur d'imbrication combine une dotation en facteurs (propre à la technologie concernée) et le composite valeur ajoutée/biens intermédiaires.

La valeur ajoutée d'un secteur est la somme de deux flux différents de production : la production qui résulte d'une "ancienne" génération de capital et celle qui résulte d'une "nouvelle" génération de capital. Les possibilités de substitution entre facteurs sont censées être plus fortes avec le nouveau capital qu'avec l'ancien. Autrement dit, les technologies ont des spécifications putty/semi-putty. Cela implique un plus long ajustement des quantités aux variations des prix. Le modèle d'accumulation du capital est le modèle néo-classique traditionnel de croissance de type Solow/Swan.

Le composite pour la valeur ajoutée est une combinaison CES de travail et de capital entendu dans un sens large. Dans le secteur des cultures, ce capital est lui-même une combinaison CES d'engrais et d'un autre composite de capital, de terres et d'énergie. Cette spécification vise à prendre en compte la possibilité de substitution entre l'agriculture intensive et l'agriculture extensive. Dans le secteur de l'élevage, les possibilités de substitution s'opèrent entre des composites terres et aliments pour animaux, d'une part, avec le même choix entre production extensive et production intensive et, d'autre part, un composite de capital d'énergie et de main-d'œuvre. La production dans les autres secteurs se caractérise par une substitution entre la main-d'œuvre et un composite de capital et d'énergie (et éventuellement d'un facteur concernant les ressources primaires qui est spécifique au secteur).

La demande de consommation des ménages est le résultat d'un comportement de maximisation statique qui correspond à un "système linéaire étendu de dépenses". Un consommateur représentatif pour chaque région – qui est preneur de prix – affecte de façon optimale son revenu disponible aux différentes possibilités de consommation et d'épargne. L'épargne est considérée comme un bien standard et ne repose pas, par conséquent, sur un comportement prospectif du consommateur.

Dans chaque région, l'État perçoit différents types d'impôts pour financer une séquence donnée de dépenses publiques. Compte tenu également d'une certaine séquence d'excédents (ou de déficits) publics, le budget de l'État s'équilibre par ajustement de l'impôt sur le revenu frappant les consommateurs.

Les échanges internationaux se composent d'un ensemble de flux régionaux bilatéraux. Le modèle adopte la spécification d'Armington¹, en supposant que les produits nationaux et les produits importés ne sont pas parfaitement substituables. De plus, les importations totales sont elles aussi imparfaitement substituables entre les régions d'origine. La répartition des échanges entre partenaires s'opère donc en fonction des prix relatifs à l'équilibre.

Les éléments de base du modèle ENV-Linkages étant similaires à ceux décrits dans van der Mensbrugge (2005), on ne reproduira pas ici toutes les équations du modèle. On verra maintenant quels sont les points sur lesquels le modèle a été amélioré.

A2.2.2. Améliorations récentes

Pour répondre aux besoins diversifiés de la Direction de l'environnement de l'OCDE, la flexibilité a été jugée essentielle dans l'élaboration d'un outil polyvalent d'analyse des politiques environnementales. L'objectif a donc été de faire en sorte que le modèle ENV-Linkages soit aussi adaptable que possible pour étudier les différents aspects des politiques à un horizon relativement proche. Les éléments introduits à cet effet sont notamment les suivants :

- Des routines polyvalentes qui extraient les données des diverses bases de données sources : la base de données GTAP, les Perspectives démographiques des Nations Unies, le FMI, l'EPA des États-Unis pour les gaz à effet de serre hors CO₂, les bases de données de l'AIE pour la demande

d'énergie et les émissions de CO₂ liées aux combustibles fossiles, les facteurs économiques de base comme la productivité, les taux d'activité, etc. De cette façon, il est possible de s'adapter à de nouvelles versions des bases de données assez facilement et à bref délai.

- Mise au point et gestion de routines de bases de données permettant la mise en œuvre d'un fichier source portant sur 96 pays/régions. Les routines d'agrégation permettent de modifier facilement les agrégations sectorielles et régionales du modèle. Les procédures génèrent automatiquement les données agrégées qui servent de projections préliminaires à partir du scénario de référence lorsqu'on procède à une simulation. Grâce à la très grande flexibilité des routines, il est possible d'introduire des modifications en fonction des différentes applications. La cohérence entre les agrégations en fonction des paramètres et des calibrages du modèle se fait pour une large part automatiquement, avec seulement un effort résiduel pour rendre les différentes agrégations largement équivalentes du point de vue économique ; autrement dit, la somme des réponses d'une région à la plupart des politiques est quasiment égale à la réaction d'ensemble d'une région agrégée. Malgré tout, certains résultats des simulations sont tributaires de l'agrégation. Par exemple, la différenciation d'Armington des produits des pays/régions subira les effets de l'agrégation retenue.
- Pour répondre aux besoins de cette étude, le modèle a été agrégé en 25 secteurs et 12 régions (voir les tableaux A2.1 et A2.2).
- Une certaine flexibilité est également possible pour la modification de la structure du modèle. Certains éléments du modèle peuvent être ajoutés ou retranchés afin de privilégier certains aspects, sans que le modèle devienne ingérable. Par exemple, il est facile de remplacer une économie à trajectoire de croissance quasi équilibrée (où le ratio capital/production est fixe) par une économie ayant une autre trajectoire de croissance. La structure de la demande d'énergie peut être elle aussi facilement modifiée. Dans le modèle actuellement utilisé, le composite énergie comprend plusieurs niveaux d'imbrication à degrés différents de substitution entre certaines sources d'énergie. On peut aussi faire évoluer dans le temps la part que représentent les échanges internationaux, au lieu de s'en tenir à une simple réaction aux variations des prix. Cela permet d'intégrer le facteur mondialisation. On a fait également en sorte que d'autres éléments soient plus flexibles. Ces changements sont importants en ce sens que la spécification du modèle peut être modifiée dans des délais relativement brefs, de façon à pouvoir étudier dans d'autres perspectives les questions jugées intéressantes.
- Les gaz à effet de serre autres que le CO₂ contribuent largement au changement climatique. Pour environ 30 %, l'effet des gaz à effet de serre d'origine humaine peut être attribué aux gaz autres que les CO₂ (en majeure partie, le méthane et l'oxyde d'azote). Selon Burniaux (2000), il serait dans de nombreux cas moins coûteux de réduire les émissions de ces gaz plutôt que de réduire les émissions de CO₂ liées à l'énergie. Ce résultat a été confirmé par d'autres études qui ont été réalisées depuis lors (Weyant et de la Chesnaye, 2006). La version actuelle du modèle prend en compte plusieurs sources d'émissions de gaz autres que le CO₂ (méthane, oxyde d'azote et gaz industriels). Pour prendre en compte ces gaz, on introduit une imbrication supplémentaire au niveau le plus élevé de la fonction de production, de façon à couvrir les émissions de ces gaz selon une procédure similaire à celle utilisée par Hyman *et al.* (2002).
- Le calibrage dynamique du modèle a été rendu plus flexible. Pour la construction du scénario de référence (par exemple, la projection centrale réalisée sur la base d'un ensemble de facteurs exogènes et servant de référence pour les simulations ultérieures des politiques), certaines tendances peuvent être déterminées de façon exogène ou peuvent rester une partie de la solution de la simulation du modèle.
- On a introduit cinq possibilités technologiques de production d'électricité.

Tableau A2.1. Secteurs du modèle ENV-Linkages

Rubrique	Désignation
1) Riz	Riz décortiqué : riz, décortiqué et non décortiqué
2) Autres cultures	Blé : blé et méteil Autres céréales : maïs, orge, seigle, avoine, autres céréales Légumes et fruits : légumes, fruits, fruits et fruits à coque, pommes de terre, manioc, truffes Graines oléagineuses : graines oléagineuses et fruits oléagineux ; soja, coprah Cannes et betteraves : canne à sucre et betterave à sucre Fibres végétales : coton, lin, chanvre, sisal et autres matières végétales brutes utilisées dans les textiles Autres cultures
3) Élevage	Animaux d'élevage : bovins, ovins, caprins, chevaux, ânes, mulets et bardots, et leur sperme Autres produits animaux : porcins, volailles et autres animaux vivants ; œufs en coquille, miel naturel, escargots Lait cru Laine : laine, soie et autres matières animales brutes utilisées dans les textiles
4) Sylviculture	Sylviculture : sylviculture, exploitation forestière et services connexes
5) Pêche	Pêche : chasse, piégeage et réserves de chasse y compris les services connexes, pêche, aquaculture ; services accessoires à la pêche
6) Pétrole brut	Parties de l'extraction du pétrole brut et services accessoires à l'extraction du pétrole, à l'exclusion des relevés
7) Extraction et distribution du gaz	Parties de l'extraction du gaz naturel et des services accessoires à l'extraction du gaz, à l'exclusion des relevés Distribution de combustibles gazeux par conduites ; production et distribution de vapeur et d'eau chaude
8) Électricité à partir de combustibles fossiles	Charbon, gaz de charbon, gaz naturel et électricité à partir de pétrole (production, transport et distribution)
9) Électricité hydraulique et géothermique	Électricité hydraulique et géothermique
10) Énergie nucléaire	Énergie nucléaire
11) Électricité solaire et éolienne	Électricité solaire, éolienne et marémotrice
12) Électricité à partir de combustibles renouvelables et de déchets	Bois, déchets ligneux, autres déchets solides ; déchets industriels ; déchets ménagers ; biogaz ; biocarburants liquides et déchets
13) Produits pétroliers et produits du charbon	Pétrole et coke : produits de cokerie, produits pétroliers raffinés, traitement du combustible nucléaire
14) Produits alimentaires	Viande bovine : viande fraîche ou réfrigérée et abats comestibles de bovins, ovins, caprins, chevaux, ânes, mulets Viande porcine et abats. Conserves et préparations de viande, d'abats ou de sang, farine Huiles végétales : huiles brutes et raffinées de soja, maïs, olives, sésame, arachide, semences d'olivier Lait : produits laitiers Riz transformé : riz, semi-blanchi ou blanchi Sucre Autres produits alimentaires : préparations et conserves de poissons ou légumes, jus de fruits et de légumes, fruits préparés, farines Boissons et produits à base de tabac
15) Autres industries extractives	Autres industries extractives : extraction de minerais métalliques, d'uranium, de pierres précieuses, autres industries extractives

Suite du tableau A2.1 page suivante

Tableau A2.1. Secteurs du modèle ENV-Linkages*(suite)*

Rubrique	Désignation
16) Métaux non ferreux	Métaux non ferreux : production et fonderie de cuivre, d'aluminium, de zinc, de plomb, d'or et d'argent
17) Sidérurgie	Sidérurgie : production de base et fonderie
18) Produits chimiques	Produits chimiques en caoutchouc : produits chimiques de base, autres produits chimiques, produits en caoutchouc et en plastique
19) Produits du travail des métaux	Produits du travail des métaux : produits métalliques laminés, mais pas machines et équipements
20) Papier et produits en papier	Papier et produits en papier : comprend l'édition, l'imprimerie et la reproduction de supports enregistrés
21) Minéraux non métalliques	Minéraux non métalliques : ciment, plâtre, chaux, graviers, béton
22) Autres industries manufacturières	Textiles : textiles et fibres synthétiques
	Habillement : vêtements, apprêt et teinture des fourrures
	Cuir : apprêt et tannage du cuir ; articles de voyage, de maroquinerie, de sellerie et de bourrellerie, chaussures
	Autres matériels de transport : fabrication d'autres matériels de transport
	Matériel électronique : matériel de bureau, comptable et informatique, matériel de radio, de télévision et de communication
	Autres machines et équipements : machines électriques, instruments médicaux, instruments de précision d'optique, montres
	Autres industries manufacturières : comprend le recyclage
	Véhicules à moteur : voitures de tourisme, camions, remorques et semi-remorques
	Bois d'œuvre : travail du bois et fabrication d'articles en bois et en liège, à l'exception des meubles ; fabrication d'articles en vannerie et sparterie
23) Services de transport	Autres transports : routiers, ferroviaires ; transport par conduites, activités auxiliaires de transport ; agences de voyage
	Transport par eau
	Transport aérien
24) Services	Commerce : toutes ventes au détail ; commerce de gros et intermédiaires du commerce ; hôtels et restaurants
	Réparation de véhicules à moteur et de biens personnels et domestiques
	Eau : captage, purification et distribution
	Vente au détail de carburants automobiles
	Communications : poste et télécommunications
	Autres intermédiations financières : comprend les activités auxiliaires, hors assurances et caisses de retraite
	Assurances : comprend les caisses de retraite, hors sécurité sociale obligatoire
	Autres services aux entreprises : immobilier, location et services aux entreprises
	Services récréatifs et autres services : activités récréatives, culturelles et sportives, autres activités de services ; ménages privés employant du personnel domestique
	Autres services (gouvernement) : administration publique et défense ; sécurité sociale obligatoire, enseignement, santé et action sociale, collecte et traitement des eaux usées, élimination des déchets, assainissement et activités similaires, activités des organisations associatives nca, organisations et organismes extraterritoriaux
25) Construction et logement	Construction : construction de logements, d'usines, de bureaux et de routes
	Logements : propriété de logements (loyers imputés des logements occupés par leur propriétaire)

Tableau A2.2. Régions du modèle ENV-Linkages

Régions ENV-Linkages	Pays/régions GTAP
1) Australie & Nouvelle-Zélande	Australie, Nouvelle-Zélande
2) Japon	Japon
3) Canada	Canada
4) États-Unis	États-Unis
5) Union européenne 27 & AELE	Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, Grèce, Irlande, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Suède, France, Allemagne, Royaume-Uni, Italie, Espagne, Suisse, Reste de l'AELE, République tchèque, Slovaquie, Hongrie, Pologne, Roumanie, Bulgarie, Chypre, Malte, Slovénie, Estonie, Lettonie, Lituanie
6) Brésil	Brésil
7) Chine	Chine, Hong Kong
8) Inde	Inde
9) Russie	Fédération de Russie
10) Pays exportateurs de pétrole	Indonésie, Venezuela, Reste du Moyen-Orient, République islamique d'Iran, Reste de l'Afrique du Nord, Nigeria
11) Pays de l'Europe de l'est non membres de l'UE	Croatie, Reste de l'ex-Union soviétique
12) Reste du monde	Corée, Taiwan, Malaisie, Philippines, Singapour, Thaïlande, Viet Nam, Reste de l'Asie de l'est, Reste de l'Asie du sud-est, Cambodge, Reste de l'Océanie, Bangladesh, Sri Lanka, Reste de l'Asie du sud, Pakistan, Mexique, Reste de l'Amérique du Nord, Amérique centrale, Reste de la Zone de libre-échange des Amériques, Reste des Caraïbes, Colombie, Pérou, Bolivie, Équateur, Argentine, Chili, Uruguay, Reste de l'Amérique du Sud, Paraguay, Turquie, Reste de l'Europe, Albanie, Maroc, Tunisie, Égypte, Botswana, Reste de l'Union douanière d'Afrique australe, Malawi, Mozambique, Tanzanie, Zambie, Zimbabwe, Reste de la Communauté de développement d'Afrique australe, Île Maurice, Madagascar, Ouganda, Reste de l'Afrique sub-saharienne, Sénégal, Afrique du sud.

A2.2.3. Instruments de politique climatique

Pour étudier l'impact des mesures de politique climatique, quatre types d'instruments sont pris en compte :

- les taxes sur les gaz à effet de serre, globales ou sectorielles, ou par gaz ou source d'émission ;
- les permis d'émission négociables (avec flexibilité entre les régions et les secteurs) ;
- les mécanismes compensatoires (notamment le Mécanisme de développement propre) ;
- les mesures réglementaires (qui sont modélisées sous la forme de *contraintes quantitatives*).

Les taxes et les permis négociables sont appliqués aux intrants des secteurs producteurs de combustibles fossiles (pétrole raffiné, gaz naturel, charbon). Ils sont également appliqués à la demande finale d'énergies fossiles. Il faut donc calculer les coefficients d'émission reliant les quantités d'émissions de dioxyde de carbone pour l'année de référence et les quantités à dollars constants pour l'année de référence. Une base de données des émissions de dioxyde de carbone a été élaborée pour le GTAP (Lee, 2002) ; elle utilise les données fournies au GTAP par l'Agence internationale de l'énergie. Les taux d'émission pour les gaz hors CO₂ proviennent de l'EPA des États-Unis (2006a). Vingt-sept sources d'émissions sur les trente-deux recensées par l'EPA des États-Unis sont prises en compte dans le modèle.

Les mesures réglementaires ont été également introduites dans le modèle via un mécanisme qui impose un coût fictif que l'entreprise supporte sur ses intrants ou son capital. Il a pour effet de modifier le coût marginal de certains intrants, ou de modifier la quantité de capital utilisée pour produire un intrant donné, mais cela se fait au moyen des instruments de marché. Pour l'analyse, il faut formuler des hypothèses concernant le coût des mesures réglementaires, mais on rompt le lien entre les instruments d'action et les transferts de recettes qui est inhérent aux mesures fiscales et aux permis négociables.

On a également introduit les impôts sur les revenus des facteurs ainsi que les impôts sur les facteurs et les subventions en faveur de l'offre de facteurs, instruments qui sont différenciés dans la version 6.2 de la base de données du GTAP.

A2.3. Structure du modèle

On s'attachera plus précisément dans cette section à la structure du modèle ENV-Linkages. Il s'agit davantage de donner un aperçu méthodologique du modèle que d'énumérer toutes les équations qu'il comporte.

A2.3.1. Consommation

Les revenus créés par l'activité économique reflètent en définitive la demande de biens et services de la part des consommateurs finals. Dans le modèle ENV-Linkages, les consommateurs sont largement similaires et sont représentés à un niveau de consommation très agrégé. Le modèle prend en compte un consommateur représentatif qui affecte son revenu disponible selon ses préférences entre les biens de consommation et l'épargne. Dans la présente version du modèle, les consommateurs achètent les biens et services produits par les entreprises (il n'y a pas de *matrice de transition* mettant en correspondance les biens produits et les biens de consommation). La décision de consommation ou d'épargne est statique, et pas prospective : l'épargne est traitée comme un « bien » et son montant est déterminé concomitamment à la demande d'autres biens, le prix de l'épargne étant fixé arbitrairement au prix moyen des biens de consommation. Cela veut dire que les consommateurs épargnent une proportion constante de leur revenu et n'ajustent pas cette proportion en fonction des événements futurs pouvant avoir un impact sur leur revenu.

On peut représenter sous la forme suivante le consommateur représentatif maximisant son bien-être (son utilité) dans le cadre de ses contraintes de ressources :

$$\begin{aligned} \text{Max } U &= \sum_k \mu_k \ln(C_k - \theta_k) + \mu_s \ln\left(\frac{S}{P_s}\right) \\ \text{avec } \sum_k P_k^c C_k + S &= Y, \quad \text{et } \sum_k \mu_k + \mu_s = 1 \end{aligned} \quad [1]$$

où U représente l'utilité, C est un vecteur des biens de consommation k , P^c est le vecteur des prix à la consommation, S représente la valeur de l'épargne, P_s est le prix à prendre en compte de l'épargne et Y est le revenu total net d'impôts (réparti dans sa totalité entre la consommation et l'épargne). Le paramètre θ est le niveau plancher de la consommation – sa principale fonction est de rendre la fonction d'utilité non homothétique, ce qui est conforme à de très nombreuses données empiriques (par exemple, Dowrick, *et al.*, 2003). Puisque les consommateurs ne sont pas censés avoir un comportement prospectif, il faut veiller à étudier les mesures que les consommateurs peuvent raisonnablement être censés anticiper – en anticipant la mesure elle-même ou ses conséquences.

Pour chaque pays, la fonction objectif du consommateur donne la consommation des ménages privés [2] et l'épargne des ménages privés [3] :

$$C_k = Pop \times \theta_k + \frac{\mu_k}{P_k^c} \times Y^*, \quad \text{où } Y^* = Y^c - Pop \times \sum_k P_k^c \times \theta_k \quad [2]$$

$$S = Y^c - \sum_k P_k^c \times C_k \quad [3]$$

où Pop représente la population, Y^c représente le revenu disponible des ménages et Y^* est un revenu *surnuméraire* (c'est-à-dire un revenu supérieur au niveau de subsistance).

Production

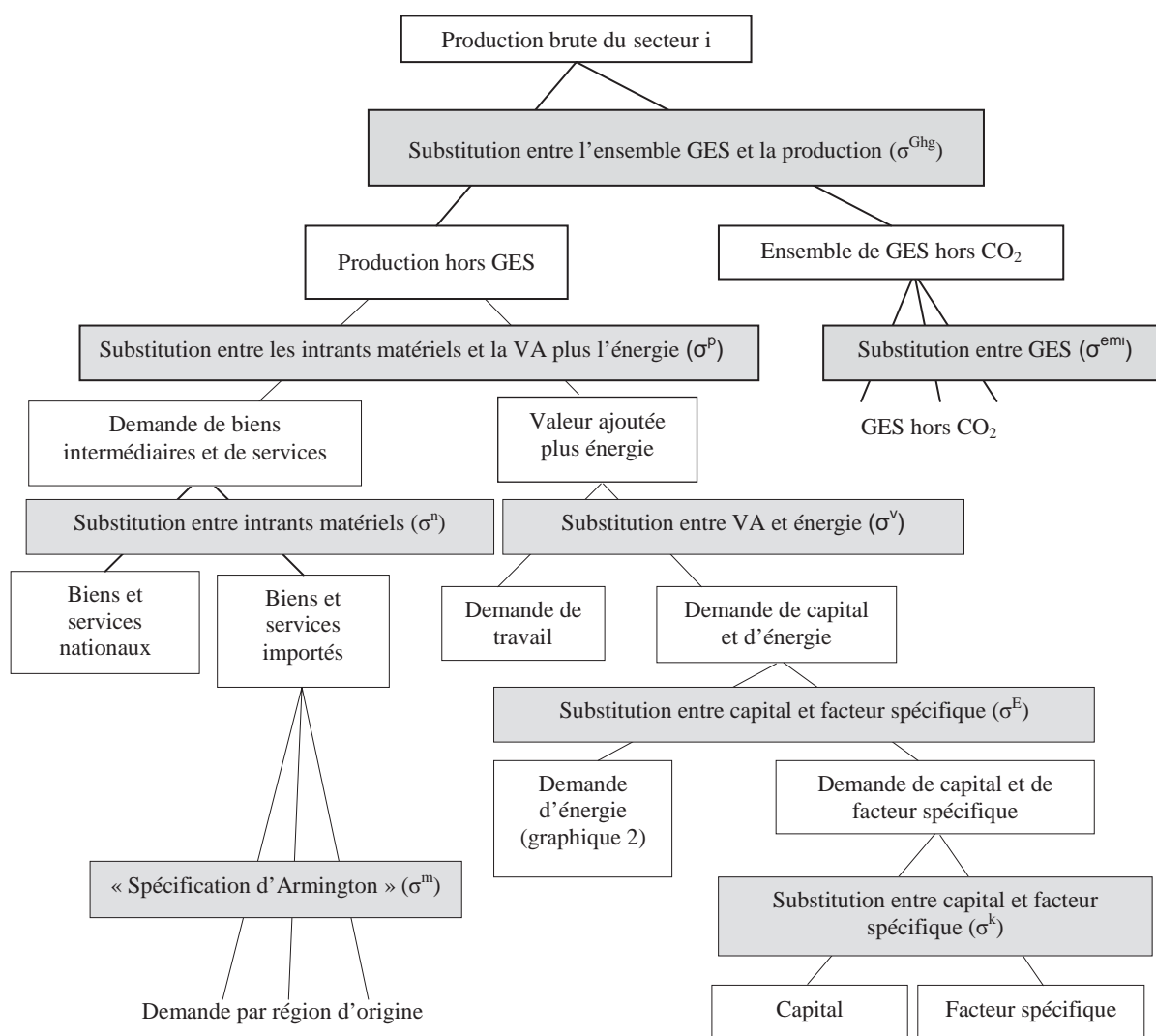
Les entreprises de tous les secteurs minimisent le coût de production des biens et services qui sont demandés par les consommateurs et les autres producteurs (nationaux et étrangers). La production est représentée par une technologie à rendements d'échelle constants.

Le graphique A2.1 illustre l'imbrication typique des secteurs du modèle (certains secteurs, notamment l'agriculture, ont une imbrication différente). L'imbrication de la production d'électricité est légèrement différente et fait l'objet du graphique A2.2.

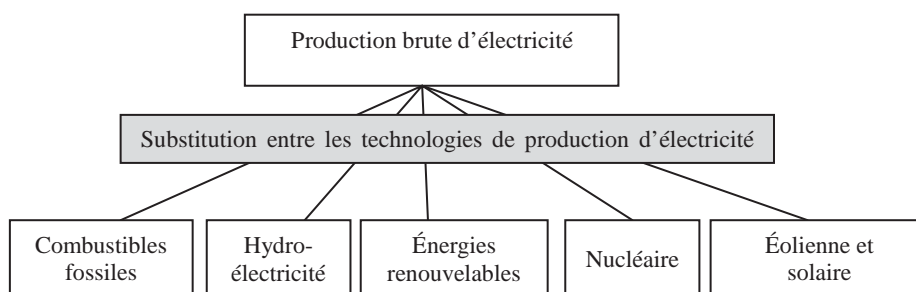
Dans le graphique A2.1, chaque nœud représente une fonction de production à élasticité constante de substitution (CES). Cette fonction donne les coûts marginaux et représente les différentes relations de substitution (et de complémentarité) entre les divers intrants pour chaque secteur. Chaque secteur utilise des consommations intermédiaires – y compris l'énergie – et des facteurs primaires (travail et capital). Dans certains secteurs, les facteurs primaires comprennent les ressources naturelles, par exemple les arbres dans la sylviculture, les terres dans l'agriculture, etc.

Au niveau supérieur d'imbrication de la production, la production finale est un bien composite combinant les émissions hors CO₂ et la production du secteur nette de ces émissions. Dans les secteurs qui n'émettent pas de gaz hors CO₂, le taux correspondant d'émission est fixé à zéro. Pour les besoins du calibrage, la valeur de ces gaz hors CO₂ est fixée arbitrairement à un prix du carbone très faible. Les sources suivantes d'émissions hors CO₂ sont prises en compte : *i*) le méthane provenant de la culture du riz, l'élevage (fermentation entérique et gestion des effluents), l'extraction du charbon, l'extraction du pétrole brut, le gaz naturel et les services (décharges) ; *ii*) l'oxyde d'azote émis par les cultures (engrais azotés), par l'élevage (gestion des effluents), par les produits chimiques (processus industriels de non-combustion) et par les services (décharges) ; *iii*) les gaz industriels (SF₆, PFC et HFC) émis par l'industrie chimique (mousses, acide adipique, solvants) et pour la production d'aluminium, de magnésium et de semi-conducteurs. Les valeurs des élasticités de substitution sont calibrées de manière à s'ajuster aux courbes de coût marginal d'atténuation qu'on peut trouver dans les ouvrages consacrés aux autres options technologiques (voir, par exemple, US-EPA (2006b)).

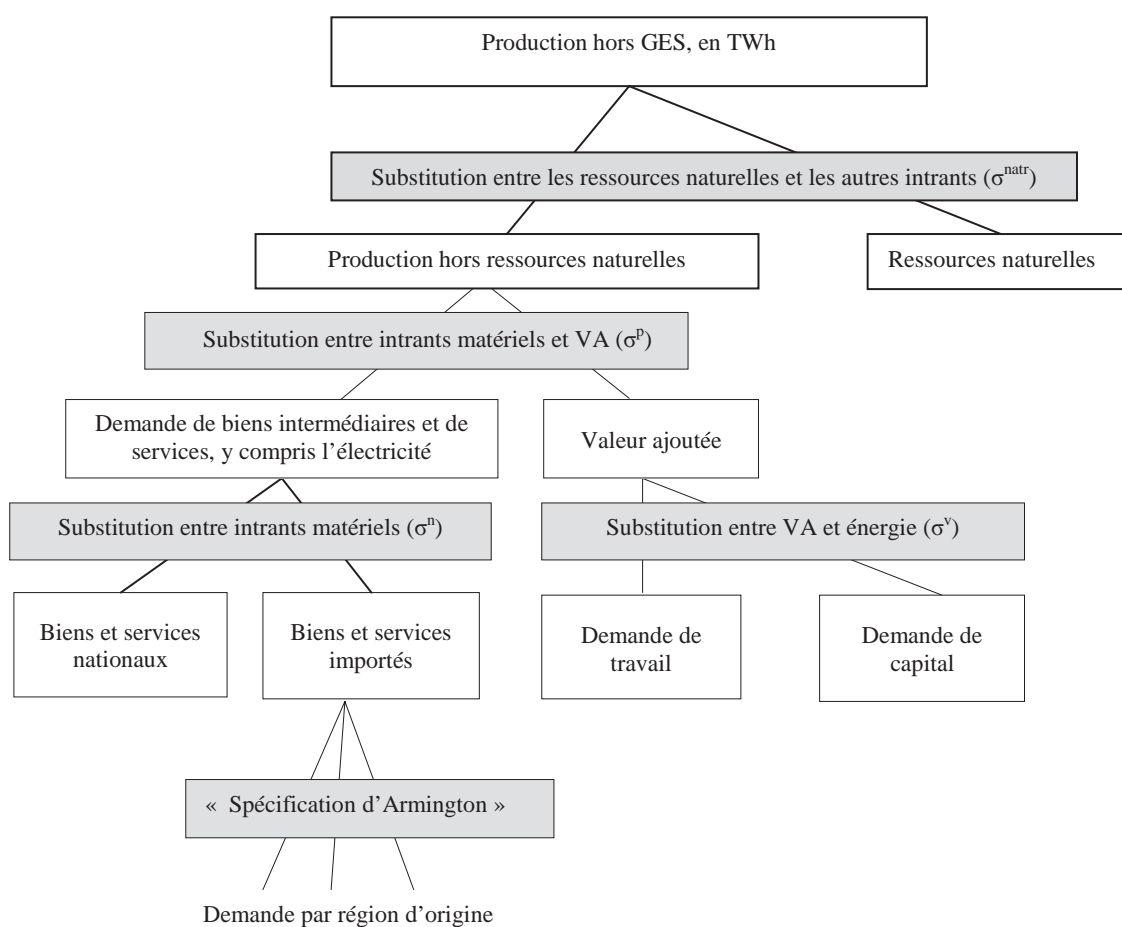
Graphique A2.1. Structure de la production dans le modèle ENV-Linkages



Note : voir le tableau A2.3 en ce qui concerne les valeurs des paramètres.

Graphique A2.2. Structure de la production d'électricité

Voir le graphique ci-après en ce qui concerne ces technologies

Structure de la production de technologies non fossiles

Avec l'imbrication de deuxième niveau, on prend en compte la production brute du secteur (nette de GES), en tant que combinaison des demandes totales intermédiaires et d'un composite de valeur ajoutée comprenant l'énergie. Pour chaque bien ou service, la production est réalisée via différents flux de production qui se différencient par l'ancienneté du capital (ancien et nouveau). Le capital qui est mis en œuvre à un moment donné est nouveau – par conséquent, l'investissement influe sur le capital de la période en cours, mais il entre dans le capital ancien (s'ajoutant au stock existant) au cours de la période ultérieure. Chaque flux de production a une structure identique de production, mais avec des paramètres technologiques différents et des élasticités différentes de substitution. Soit $X_{i,v}$ la production brute du secteur i (nette de GES) utilisant un capital de génération v , les équations représentant la production sont obtenues en appliquant les conditions de premier ordre [4] à [6] de l'objectif de maximisation des bénéfices de la société.

$$INT_i = \sum_v \alpha_{i,v}^{INT} \times A_{i,v}^{\sigma_{i,v}^p - 1} \times \left(\frac{VC_{i,v}}{P_i^{INT}} \right)^{\sigma_{i,v}^p} \times X_{i,v} \quad [4]$$

$$VA_{i,v} = \alpha_{i,v}^{VA} \times A_{i,v}^{\sigma_{i,v}^p - 1} \times \left(\frac{VC_{i,v}}{P_i^{VA}} \right)^{\sigma_{i,v}^p} \times X_{i,v} \quad [5]$$

$$VC_{i,v} = \frac{1}{A_i} \times \left[\alpha_{i,v}^{INT} (P_i^{INT})^{1-\sigma_{i,v}^p} + \alpha_{i,v}^{VA} (P_i^{VA})^{1-\sigma_{i,v}^p} \right]^{(1/(1-\sigma_{i,v}^p))} \quad [6]$$

où INT est l'ensemble de demandes intermédiaires (et P^{INT} son prix), VA représente la valeur ajoutée (et P^{VA} son prix), VC est le coût unitaire variable de la production d'une unité de production nette de GES (les coûts moyens comprennent le coût du capital) et A est un terme de changement technique. Pour déterminer le coût pour l'ensemble du secteur comprenant les deux générations de capital, on fait une moyenne (pondérée) des coûts variables entre les deux générations.

Le modèle comporte certaines rigidités d'ajustement. L'une des caractéristiques importantes est la distinction entre le capital ancien et le capital nouveau. De plus, le capital ancien n'est censé être que partiellement mobile d'un secteur à l'autre, en raison des différences de possibilités commerciales des biens en capital d'un secteur à l'autre. En outre, l'utilisation du capital ancien et du capital nouveau est homogène.

Pour chaque période, l'offre de facteurs primaires (par exemple, capital, travail, terres et ressources naturelles) est généralement prédéterminée. Sur la partie droite de l'arborescence du graphique A2.1, la valeur ajoutée se compose d'un intrant de travail [7] et d'un ensemble composite de capital et d'énergie [8] :

$$L_i = \sum_v \alpha_{i,v}^L \times \lambda_i^{\sigma_{i,v}^v - 1} \times \left(\frac{P_{i,v}^{VA}}{W_i} \right)^{\sigma_{i,v}^v} \times VA_{i,v} \quad [7]$$

$$KE_{i,v} = \alpha_{i,v}^{KE} \times \left(\frac{P_{i,v}^{VA}}{P_{i,v}^{KE}} \right)^{\sigma_{i,v}^v} \times VA_{i,v} \quad [8]$$

où L représente le travail (et W son prix), λ est le progrès technique associé au travail et KE est l'ensemble capital/énergie (et P^{KE} son prix). Le prix de la valeur ajoutée pour la génération v est égal à :

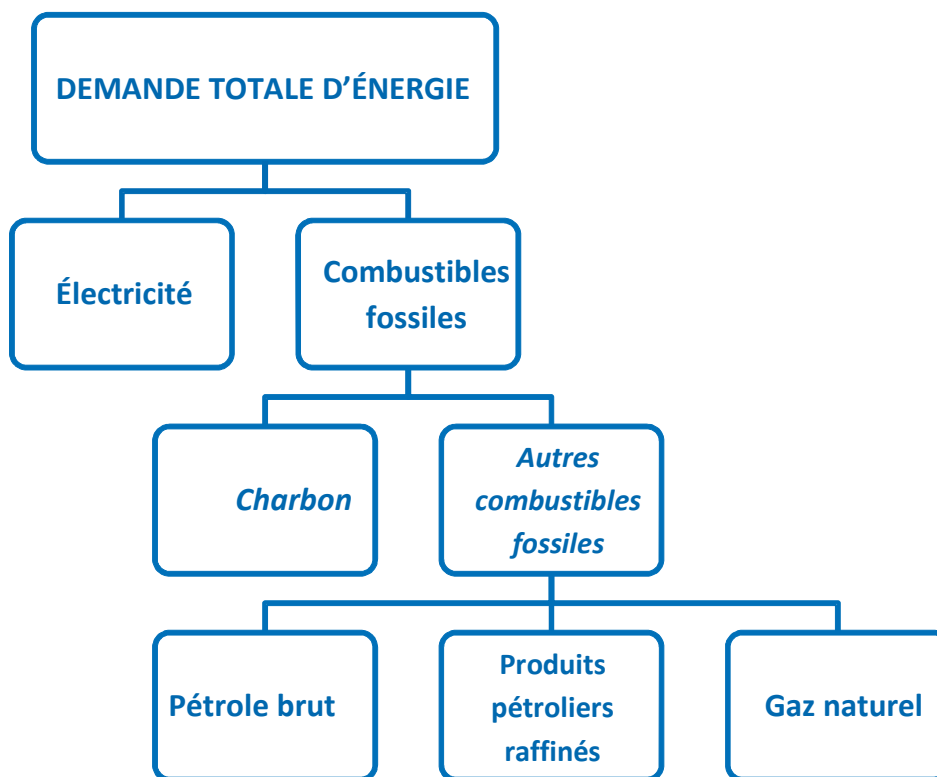
$$P_{i,v}^{VA} = \frac{1}{A_{i,v}} \times \left[\alpha_{i,v}^{KE} (P_{i,v}^{KE})^{1-\sigma_{i,v}^Y} + \alpha_{i,v}^L \left(\frac{W_i}{\lambda_i} \right)^{1-\sigma_{i,v}^Y} \right]^{(1/(1-\sigma_{i,v}^Y))} \quad [9]$$

L'ensemble valeur ajoutée (VA) est un sous-élément du nœud supérieur donnant la production sectorielle X_i nette de GES. Il y a des sous-éléments similaires pour les composantes capital et énergie. En fait, comme le montre le graphique A2.1, le capital est associé à une ressource spécifique au secteur lorsqu'il en existe une et l'énergie est elle-même un ensemble de différents intrants énergétiques.

Pour la structure de la production d'électricité, on suppose qu'un producteur d'électricité représentatif maximise son profit en mettant en œuvre les cinq technologies de production disponibles et en utilisant une spécification CES à forte élasticité de substitution (graphique A2.2). La production des technologies ne reposant pas sur les combustibles fossiles (nette de GES et exprimée en TWh) a une structure similaire à celle des autres secteurs, à ceci près que le niveau supérieur d'imbrication associe une ressource naturelle spécifique à un secteur, d'une part et, d'autre part, tous les autres intrants. Cette spécification vise à prendre en compte l'offre de ces technologies de production d'électricité compte tenu de la valeur de l'élasticité de substitution.

L'ensemble énergie est particulièrement intéressant pour l'analyse des questions liées au changement climatique. L'énergie, comme le montre le graphique A2.3, est un composite de combustibles fossiles et d'électricité. De même, les combustibles fossiles sont un composite de charbon et d'un ensemble « d'autres combustibles fossiles ». Au niveau inférieur d'imbrication, le composite « autres combustibles fossiles » comprend le pétrole brut, les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel. La valeur des élasticités de substitution est choisie de manière à impliquer un degré plus élevé de substitution entre les autres combustibles qu'avec l'électricité et le charbon.

Graphique A2.3. Structure de la demande d'énergie dans le modèle ENV-Linkages



Note : voir le tableau A2.3 en ce qui concerne la valeur des paramètres.

Source : OCDE.

Compte tenu du double flux de production (à partir du capital ancien et à partir du capital nouveau), la substituabilité est plus forte entre les sources d'énergie lorsque le capital est nouveau, mais au bout d'un an, le coût correspondant devient irrécupérable et tombe à un faible niveau de substituabilité entre sources d'énergie. De plus, dans les secteurs qui produisent des combustibles fossiles (à l'exception du gaz naturel), il n'y a pas de substituabilité entre les intrants énergétiques. Le faible degré de substituabilité de l'énergie en présence d'un capital nouveau est conforme aux constats empiriques de Arnberg et Bjorner (2007), qui ont examiné les variations d'intensité énergétique au niveau de l'entreprise. Mais, puisqu'avec le présent modèle il est possible de modifier la composition du secteur, la réactivité globale aux variations des prix de l'énergie sera plus marquée que celle observée par ces chercheurs au niveau de l'entreprise.

La combinaison optimale d'intrants d'un secteur étant déterminée par les prix relatifs, les prix de la production sectorielle (y compris les GES) sont calculés sous l'hypothèse de conditions d'offre concurrentielles (bénéfice nul).

Investissement et équilibres sur les marchés des biens

Dans cette version du modèle, il n'y a pas de mécanisme reliant l'investissement aux taux d'intérêt. Pour chaque période, l'investissement, net de l'amortissement économique, est égal à la somme de

l'épargne publique, de l'épargne des consommateurs et des flux nets de capitaux en provenance de l'étranger. L'investissement et la demande publique utilisent les biens finals selon une spécification CES. Puis la demande totale d'un bien de l'économie est égale à la demande finale des consommateurs, plus les demandes intermédiaires des entreprises, plus les demandes intermédiaires des secteurs produisant des biens finals, ce qui correspond aux dépenses publiques et aux dépenses d'investissement.

Les équilibres sur les marchés des biens impliquent que, d'une part, la production totale de tout bien ou service est égale à la demande adressée aux producteurs nationaux, plus les exportations, et, d'autre part, la demande totale se répartit, selon le principe d'Armington, entre les demandes (finales et intermédiaires) adressées aux producteurs nationaux et la demande d'importations (voir ci-après).

Commerce extérieur

Le commerce mondial dans le modèle ENV-Linkages est fonction d'un ensemble de flux bilatéraux régionaux. L'hypothèse de base est que les importations en provenance de différentes régions sont des substituts imparfaits. Par conséquent, dans chaque région, la demande totale d'importations pour chaque bien se répartit entre les partenaires commerciaux selon la relation entre les prix qu'ils pratiquent à l'exportation. Cette spécification des importations – qu'on appelle habituellement la « spécification d'Armington » – implique que chaque région voit diminuer la demande pour ses exportations si ces prix intérieurs augmentent. Pour la spécification d'Armington, on utilise deux imbrications CES. Au niveau supérieur, les agents nationaux choisissent la combinaison optimale du bien national et d'un bien total importé [10]. Au niveau inférieur, les agents répartissent de façon optimale la demande du bien total importé [12] entre les partenaires commerciaux r' .

$$XMT_i = \beta_i^m \times \left(\frac{PA_i}{PMT_i} \right)^{\sigma_i^m} \times XA_i \quad [10]$$

$$PMT_i = \left[\sum_r \beta_{i,r}^w PM_{i,r}^{1-\sigma_{i,r}^w} \right]^{(1/(1-\sigma_i^w))} \quad [11]$$

où XMT est l'ensemble d'importations d'un bien ou service donné (et PMT son prix) et XA représente la demande globale de biens produits dans le pays et de biens importés (et PA est son prix).

$$WTF_{r',i} = \beta_{r',i}^w \times \left(\frac{PMT_i}{PM_{r',i}^M} \right)^{\sigma_i^w} \times XMT_i \quad [12]$$

où $WTF_{r'}$ est l'importation d'un bien au service donné provenant de la région r' . Son prix, $PM_{r'}$, représente le prix national à l'importation (par exemple, le prix national à la production de son partenaire r' , ajusté pour tenir compte d'éventuels impôts aux subventions à l'exportation, de la marge pour le transport, des coûts « iceberg » et des droits de douane nationaux).

Prix

Le modèle ENV-Linkages est totalement homogène du point de vue des prix et seuls les prix relatifs comptent. Tous les prix sont exprimés par rapport au numéraire du système de prix arbitrairement choisi, l'indice OCDE des prix des exportations de produits manufacturés. Du point de vue de la spécification du modèle, cela a un impact sur l'évaluation des flux d'investissement internationaux. Ces flux sont évalués par rapport aux prix du numéraire. Par conséquent, on peut interpréter les flux d'investissement

étrangers en ce sens qu'ils représentent la quantité d'épargne étrangère qui achètera l'ensemble moyen d'exportations de produits manufacturés pour la zone de l'OCDE.

Le prix intérieur à la production du bien j est défini dans le modèle comme un indice composite du coût variable moyen [6] et du coût de l'ensemble de GES hors CO_2 , plus les impôts sur la production. Le prix global de marché d'un bien i (PA) est calculé sous la forme d'un indice composite des prix intérieurs à la production et des prix à l'importation. Par conséquent, les prix de la demande finale ou de la demande intermédiaire sont les prix du marché (PA), plus les droits *ad valorem* spécifiques à l'agent.

Administrations publiques et bouclage à long terme

Les administrations publiques perçoivent des impôts sur le revenu, des impôts indirects sur les biens indirects et la consommation finale ainsi qu'éventuellement des taxes sur le carbone, des taxes sur la production, des droits de douane et des taxes à l'exportation, et elles peuvent également accorder des subventions à l'exportation. Les dépenses publiques totales sont reliées au PIB en termes réels. Puisqu'il est difficile de prévoir les mesures correctrices que prendront les pouvoirs publics, le déficit public en termes réels est exogène. Le bouclage du modèle implique qu'un instrument budgétaire est endogène, afin de respecter la contrainte budgétaire publique. La règle de bouclage budgétaire dans le modèle ENV-Linkages est que le taux de l'impôt sur le revenu s'ajuste pour compenser les variations des dépenses publiques qui peuvent se produire, ou que ce taux s'ajuste en fonction des autres impôts. Par exemple, une réduction ou une suppression de droits de douane est compensée par une hausse de l'impôt direct sur les ménages, toutes choses égales par ailleurs. On peut facilement appliquer d'autres règles de bouclage.

Chaque région enregistre un excédent (ou un déficit) de balance courante, qui est fixe (du point de vue du numéraire du modèle). Le bouclage par le côté international de chaque économie s'opère par une sortie nette (ou une entrée nette) de capitaux, contrepartie de ces déséquilibres, qu'on soustrait du flux d'épargne intérieure (ou qu'on ajoute à ce flux). Les flux nets de capitaux sont exogènes. Pour chaque période, le modèle fait correspondre l'investissement à l'épargne (qui est égale à la somme de l'épargne des ménages, de la situation budgétaire nette des administrations publiques et des flux de capitaux étrangers). Par conséquent, les séquences pour l'épargne publique et l'épargne étrangère étant exogènes, l'investissement est en définitive induit par l'épargne des ménages.

Caractéristiques dynamiques

Le modèle ENV-Linkages a une structure dynamique récursive simple, les agents économiques étant censés agir à courte vue et baser leurs décisions sur des anticipations statiques de prix et de quantités. L'élément dynamique du modèle tient à deux sources endogènes : *i*) l'accumulation de capital productif et *ii*) la spécification putty/semi-putty de la technologie. Il tient aussi à des facteurs exogènes comme la croissance démographique ou les variations de la productivité.

Accumulation du capital et répartition sectorielle du capital

À un niveau global, la fonction de base d'accumulation du capital fait correspondre le stock courant de capital au stock amorti hérité de la période précédente, plus l'investissement. Les différences de taux sectoriel de rendement déterminent la répartition de l'investissement entre les secteurs. Le modèle comporte deux générations de capital, mais l'investissement s'ajoute seulement au capital nouveau. Par conséquent, les secteurs où l'investissement est plus élevé sont mieux à même de s'adapter aux changements que les secteurs à faible niveau d'investissement. De fait, les secteurs en déclin dont le

capital ancien est moins productif commencent à vendre du capital aux autres entreprises (qu'elles peuvent utiliser après avoir supporté certains coûts d'ajustement)².

La spécification putty/semi-putty

Les possibilités de substitution entre facteurs de production sont censées être plus fortes avec le capital nouveau qu'avec le capital ancien, ce qui veut dire que la technologie a une spécification putty/semi-putty. Par conséquent, en cas de choc sur les prix relatifs (par exemple, suppression d'un droit de douane), la demande de facteurs de production s'ajuste progressivement jusqu'au niveau d'équilibre à long terme parce que les effets de substitution sont différés. La trajectoire d'ajustement est fonction de la valeur des élasticités de substitution à court terme et du taux de remplacement du capital. Ce dernier déterminant le rythme auquel de nouvelles générations de capital sont mises en place, plus le volume de nouveaux investissements est élevé, plus la possibilité est forte de réaliser le montant total à long terme de substitution entre les facteurs de production.

A2.4. Calibrage du modèle ENV-Linkages

Le modèle ENV-Linkages est calibré en trois phases. Premièrement, on calibre un certain nombre de paramètres, compte tenu de certaines élasticités, sur les valeurs des variables pour l'année de référence (2011). Il s'agit du calibrage statique. Deuxièmement, la base de données pour 2001 est actualisée à 2005 en procédant à une simulation dynamique du modèle sur la période 2001-05 et on réalise de nouveau une calibration statique avec renormalisation des prix afin d'exprimer toutes les variables en USD de 2005 en termes réels. Troisièmement, pour obtenir la projection de base, on définit un ensemble de facteurs socio-économiques exogènes (tendances démographiques, productivité du travail, évolution future des prix de l'énergie et gains d'efficacité énergétique) et on fait de nouveau tourner le modèle dynamiquement sur la période 2005-50³.

A2.4.1. Calibrage statique du modèle

Un grand nombre de paramètres clés sont fixés à partir des informations tirées de diverses études empiriques et sources de données (élasticités de substitution, élasticités-revenu de la demande, élasticités de l'offre de ressources naturelles, etc.). Le tableau A2.3 illustre les principales élasticités utilisées dans la version actuelle du modèle. Pour l'utilisation de ces paramètres, on pourra se reporter aux graphiques A2.1 et A2.2, ainsi qu'aux équations de la section A2.3. Les élasticités-revenu de la demande des ménages et les élasticités d'Armington sont reprises de la base de données GTAP 6.2.

Les informations disponibles concernant la valeur de ces paramètres sont néanmoins insuffisantes pour que la simulation du modèle puisse reproduire la valeur des données de l'année de référence. Compte tenu des choix de modélisation pour la représentation des comportements et des relations structurelles techniques, il faut calculer certains paramètres du modèle de façon à ce qu'ils s'ajustent aux données de l'année initiale (exprimées en USD 2001) de la version 6 de la base de données GTAP. En règle générale, les paramètres utilisés à cet effet sont ceux dont l'impact sur les résultats en termes de taux de variation restent limités (paramètres d'échelle) ou ceux pour lesquels il n'y a pas d'études empiriques (coefficients en termes de part dans les fonctions CES)⁴.

Tableau A2.3. Valeur des principaux paramètres

Paramètre		Valeur
σ^{Ghg}	Substitution entre le composite GES et la production nette de GES	La substitution se situe entre 0.03-0.05 pour les activités agricoles et 0.15-0.3 pour certaines émissions industrielles
σ^P	Substitution entre les intrants matériels et la VA plus l'énergie	La substitution entre les intrants matériels et la VA plus l'énergie est égale à 0, sauf pour le capital nouveau dans les activités manufacturières, où elle est égale à 0.1
σ^n	Substitution entre les intrants matériels	La substitution entre les intrants matériels est égale à 0 pour le secteur hors services et hors activités manufacturières et à 0.1 pour les autres secteurs
σ^V	Substitution entre VA et énergie	0.05 pour les générations anciennes de capital et 0.4 pour les nouvelles générations dans l'agriculture, la sylviculture et la pêche ainsi que les secteurs producteurs de combustibles fossiles et elle varie de 0.2 à 0.27 (1.8-2.1 dans les autres secteurs)
σ^f	Substitution entre l'investissement dans les intrants et les dépenses publiques	0.8
σ^E	Substitution entre le capital et l'énergie	0 pour les générations anciennes de capital, 0.2-0.8 pour les nouvelles générations, mais toujours 0 dans les secteurs du charbon et du pétrole brut
σ^k	Substitution entre le capital et le facteur spécifique	Cette substitution est égale à 0
σ^{ELY}	Élasticité entre l'électricité et les intrants énergétiques autres que l'électricité	0.062 pour le capital ancien et 0.5 pour le capital nouveau dans le secteur de l'électricité. 0.12 et 1 dans les autres secteurs, sauf les combustibles fossiles, où elle est égale à 0, et les produits chimiques, où elle varie entre 0.08 et 0.4
σ^{Coa}	Élasticité entre le composite charbon et hors charbon	0.03 pour le capital ancien et 0.25 pour le capital nouveau dans le secteur de l'électricité. 0.12 et 1 dans les autres secteurs, sauf les combustibles fossiles, où elle est égale à 0
σ^{Ep}	Élasticité entre les intrants énergétiques dans le composite hors charbon	0.25 pour les générations anciennes de capital, 2 pour les nouvelles générations, mais toujours 0 dans le secteur de l'énergie, sauf pour l'électricité
σ^X	Élasticité d'Armington, production intérieure/importations	Entre 0.9 et 5 en fonction du secteur, identique d'une région à l'autre. Les données GTAP ont été utilisées
σ^W	Élasticité d'Armington, sources d'importation	Identique à σ^X
σ^M	Élasticité d'Armington, importations de biens intermédiaires	Identique à σ^X
σ^{El}	Élasticité d'Armington, importations d'énergie	Identique à σ^X
σ^{elec}	Élasticité entre les technologies de production d'électricité	10
σ^{natr}	Élasticité entre les ressources spécifiques et les autres intrants	Uniquement pour les technologies de production d'électricité ne faisant pas appel aux combustibles fossiles, variable entre 0.0 et 0.4

A2.4.2. Calibrage dynamique du modèle

Idéalement, un choix avisé de tendances prospectives des variables exogènes permettrait d'obtenir un ensemble de scénarios acceptables. Mais il est difficile de couvrir toutes ces tendances de façon exhaustive. De plus, les comparaisons des différents scénarios seraient pratiquement ingérables. C'est pourquoi la démarche retenue consiste à ne prendre en compte qu'un seul ensemble de facteurs exogènes, tout en reconnaissant que d'autres ensembles pourraient donner des résultats de simulation quelque peu différents⁵. La projection de référence permet de calculer les valeurs d'un certain nombre de paramètres (par exemple, les gains d'efficacité énergétique) afin de reproduire l'évolution des facteurs exogènes. Pour toute variante ou simulation d'une politique, ces valeurs des paramètres sont maintenues constantes et toutes les autres variables du modèle sont totalement endogènes⁶.

On énumérera ci-après les facteurs exogènes spécifiés dans la projection de référence :

- Prévisions démographiques et évolution de l'emploi.
- Croissance de la productivité moyenne du travail, globale et sectorielle, avec contrôle par calibrage des coefficients de progrès technique incorporés dans le facteur travail.
- Gains autonomes d'efficience pour le capital, la terre et les ressources naturelles spécifiques.
- Gains autonomes d'efficience des engrais dans les cultures et de l'élément « aliments pour animaux » dans l'élevage.
- Offre de terre et de ressources naturelles (sauf pour les secteurs producteurs de combustibles fossiles).
- Marges dans le commerce international.
- Part des dépenses publiques dans le PIB réel.
- Épargne publique et flux d'épargne internationale.
- Demande d'énergie (projections sur la base des élasticités de la demande au PIB) pour tous les types de demandes de combustibles, sauf le pétrole brut, avec contrôle par calibrage des améliorations autonomes de l'efficacité énergétique dans l'utilisation d'énergie, par secteur et par type de combustible.
- Prix internationaux des combustibles fossiles, avec contrôle par calibrage de l'offre potentielle de ressources en combustibles fossiles.
- Ratios investissement/PIB, avec contrôle par calibrage de la propension marginale des ménages à épargner.
- Émissions de GES hors CO₂, avec contrôle par calibrage des gains autonomes d'efficience dans les émissions de GES hors CO₂, par secteur et par type d'émissions de GES.
- Part de chaque type de technologie de production d'électricité, avec contrôle par calibrage des « ressources naturelles » spécifiques.

A2.4.3. Données utilisées pour le calibrage dynamique

Les variables socio-économiques telles que la population, la productivité apparente du travail ou les ratios investissement/PIB sont examinées dans Duval et De la Maisonneuve (2009).

Les améliorations autonomes de l'efficacité énergétique dans l'utilisation d'énergie ont été calibrées dynamiquement sur la base de l'élasticité de chaque type de demande d'énergie au PIB pour 2005-30, selon les projections du *World Energy Outlook* de l'AIE (2006). Ces élasticités sont censées évoluer après 2030 selon leurs tendances prévues sur la période 2025-30.

La répartition de la production d'électricité entre les cinq technologies est calibrée sur la base des projections de *World Energy Outlook* de l'AIE (2008).

Les gaz à effet de serre hors CO₂ doivent être calibrés dans la base de données de l'année de référence. À cette fin, le prix de ces émissions est arbitrairement fixé à 0.5 USD la tonne d'équivalent CO₂ dans le module supérieur de la production brute. Les émissions par source figurant dans US EPA (2006b) sont associées aux secteurs du modèle ENV-Linkages et, par souci de cohérence, les niveaux de

GES en 2005 sont ajustés de façon à correspondre aux données de l'AIE. Il n'a pas été possible d'associer toutes les sources d'émissions à une activité économique décrite dans le modèle⁷. Pour la période 2005-20, les émissions autres que de CO₂ sont calibrées sur les prévisions de l'EPA des États-Unis en ajustant un paramètre d'efficacité autonome dans le composite d'émissions de la fonction de production. Après 2020, on prolonge la tendance de la période 2015-20, sauf pour les sources agricoles d'émissions de GES hors CO₂, pour lesquelles la tendance est reprise des *Perspectives de l'environnement de l'OCDE* (2008).

L'évolution des prix internationaux à l'importation des combustibles fossiles est également prise en compte dans le scénario de référence. Pour la période 2005-08, le modèle reproduit les évolutions historiques et les prévisions à court terme de l'AIE pour *World Energy Outlook 2008*. À moyen terme (2007 à 2030), les réserves potentielles de pétrole brut des « pays exportateurs de pétrole » (voir le tableau A2.2 en ce qui concerne la composition de cette région) sont calibrées de façon à reproduire la trajectoire exogène des prix internationaux du pétrole brut retenue dans les prévisions de l'AIE (2008). Après 2030, le prix est censé augmenter de 1 % en termes réels chaque année et les réserves calibrées des pays exportateurs de pétrole diminuent progressivement sous l'effet d'un certain épuisement des réserves existantes.

Conformément aux projections de l'AIE, l'évolution du prix international du gaz naturel suit de près celle du pétrole brut. À cet effet, on ajuste les ressources en gaz naturel dans toutes les régions productrices. Après 2030, le lien entre le prix international du pétrole et celui du gaz naturel est censé être plus lâche, ce qui correspond à l'hypothèse d'une plus forte élasticité de l'offre de gaz naturel à plus long terme. On fait intervenir la flambée historique du prix international de charbon jusqu'en 2008 en contrôlant l'offre des régions productrices de charbon. Après 2008, le prix du charbon est entièrement déterminé par les mécanismes du modèle et reste quasiment constant en termes réels, l'offre de charbon étant censée être élastique au niveau mondial.

Entre 2001 et 2005, les soldes de balance courante et l'épargne publique sont calibrés sur les données historiques du FMI. Après 2005, les déficits (ou excédents) des finances publiques et les déficits (ou excédents) de balance courante sont censés diminuer progressivement (à un taux arbitraire de 2.5 % de réduction). Toutefois, l'excédent chinois et le déficit des États-Unis sont censés se contracter moins rapidement (seulement après 2020).

A2.4.4. Calibrage dynamique des préférences des ménages

Les paramètres pour la demande des ménages (voir les équations [1] à [3]) doivent être en outre recalibrés dynamiquement dans la simulation de référence. Dans le modèle ENV-Linkages, les préférences des ménages comprennent pour la demande de chaque bien un niveau minimum de subsistance qui fait que la fonction d'utilité n'est pas homothétique. Mais si l'on utilise le modèle sur une assez longue période prévisionnelle, le revenu des ménages augmente assez fortement et, si la demande minimum pour le niveau de subsistance n'est pas ajustée, l'élasticité-revenu de la demande pour tous les biens converge vers l'unité. On remédie à ce problème en ajustant les paramètres de subsistance dans le scénario de référence pour chaque période afin de reproduire l'ensemble souhaité d'élasticités-revenu.

Par ailleurs, dans la simulation de référence, les élasticités-revenu de la demande évoluent dans le temps selon un mécanisme de convergence conditionnelle des préférences des ménages (par exemple, à travers l'élasticité-revenu de la demande de produits non énergétiques) par alignement des pays non membres de l'OCDE sur les pays membres, en fonction du revenu relatif par habitant.

A2.4.5. Ajustement dynamique de la structure du commerce mondial et de la production

Dans un modèle comme ENV-Linkages, qui utilise des spécifications dites d'Armington pour représenter les flux d'échanges internationaux, les pays se trouvent confrontés à une courbe de demande descendante pour leurs exportations. Par conséquent, un pays à forte croissance connaîtra généralement une baisse de ses prix relatifs des facteurs entraînant une dépréciation de son taux de change réel, toutes choses étant égales par ailleurs (abstraction faite de l'effet compensatoire Balassa-Samuelson). Cela ne paraît pas conforme au passé, qui montre que les importations en provenance de pays à forte croissance ont typiquement augmenté via la création de nouveaux produits plutôt que via une baisse des prix (voir en particulier, Krugman, 1989). Pour prendre en compte cette caractéristique historique de manière simplifiée, la projection de base repose en outre sur l'hypothèse d'un accroissement exogène progressif de la part des pays non membres de l'OCDE dans les importations totales des pays de l'OCDE.

De plus, l'intensification de la concurrence mondiale s'accompagne d'une plus large utilisation des services dans la production, conformément à l'argumentation avancée dans OCDE (2005). C'est pourquoi, dans les simulations, on ajuste dynamiquement la structure d'entrées/sorties de façon à donner plus de poids aux services (au sens large) dans la composition de l'élément « biens intermédiaires », pour les secteurs autres que l'agriculture et les combustibles non fossiles.

A2.4.6. Logiciel et solutions

Le modèle ENV-Linkages est écrit en langage GAMS, particulièrement utile pour la modélisation numérique de systèmes d'optimisation linéaire, non linéaire et en nombres entiers mixtes. Le logiciel comporte un certain nombre de solveurs qui peuvent être utilisés pour un problème particulier et le changement de solveur est simple dans la plupart des cas. Dans le passé, cela s'est révélé utile, puisque les problèmes qu'on ne peut résoudre avec un seul algorithme peuvent se résoudre avec un autre algorithme.

Pour les problèmes de nature économique, GAMS peut être particulièrement intéressant puisqu'il permet de formaliser les problèmes en complémentarité mixte, en spécifiant les inégalités auxquelles la solution doit satisfaire. Cela facilite la solution des problèmes faisant intervenir une contrainte budgétaire ou des produits homogènes produits par de multiples secteurs.

A2.4.7. Évolutions futures du modèle

Plusieurs éléments nouveaux seront introduits dans le modèle ENV-Linkages pour améliorer son applicabilité aux analyses de politique climatique.

Captage et stockage du carbone

Le captage et le stockage du dioxyde de carbone permettent de réduire les émissions en procédant d'abord à l'extraction du CO₂ des gaz de combustion (généralement de la production d'électricité), de la transformation de combustible et d'autres processus industriels, notamment la production de ciment. Après captage et compression, le CO₂ est transporté par conduites ou navires-citernes sur un site de stockage, en général pour être injecté dans une formation géologique adaptée, mais aussi, parfois, pour être enfoui en eaux profondes. Plusieurs études (par exemple, AIE, 2004) ont étudié la faisabilité du captage et du stockage de carbone, en concluant généralement qu'à un prix proche de 50 USD la tonne de CO₂, ce captage et ce stockage sont réalisables pour la combustion de gaz et de charbon. Il y a une pénalité énergétique à payer, et le coût en capital est élevé, mais aucun obstacle technique ne semble devoir s'y opposer. Compte tenu des résultats des diverses études, le captage et le stockage de carbone

sont pris en compte dans la version actuelle du modèle ENV-Linkages, mais ils n'ont pas été utilisés dans les simulations dont il est fait état dans cet ouvrage.

Émissions par changement d'affectation des sols

Une source d'émissions de GES qui pourrait être importante et qui n'est pas prise en compte à ce stade est celle liée à un changement d'affectation des sols. Selon Achard, *et al.* (2004), cette source pourrait être substantielle, mais les données sont actuellement très médiocres et les analyses scientifiques sont incomplètes. Lorsque la qualité des données sera meilleure et que les analyses seront moins fragmentaires, ce facteur sera incorporé dans le modèle.

A2.4.8. Conclusions

ENV-Linkages est un modèle économique évolutif pour la prise de décision en politique environnementale. Il repose sur des bases rigoureuses d'économie d'équilibre général et prend en compte les aspects fondamentaux de l'économie mondiale. Il facilite ainsi l'examen et la quantification d'un large éventail d'initiatives des pouvoirs publics. Pour les mesures telles que la taxation du dioxyde de carbone, le modèle ENV-Linkages représente très efficacement tout l'ensemble des répercussions qu'aurait une telle taxe en termes d'équilibre général.

Certaines des limitations du modèle pour la représentation de certains phénomènes comme la mobilité endogène du capital et les comportements prospectifs font qu'il ne peut pas correctement prendre en compte certains types de mesures. Par exemple, les mesures futures annoncées aujourd'hui n'auront pas d'effet dans le modèle sur le comportement actuel des entreprises et des consommateurs. Cela aura pour résultat de surestimer le coût des mesures au moment de leur mise en œuvre effective. En revanche, dans la mesure où l'annonce d'une mesure n'est pas pleinement crédible, la réponse du modèle à cette mesure pourra être plus appropriée. Cet exemple montre combien il est nécessaire de présenter les résultats du modèle tout en examinant bien le contexte dans lequel les mesures sont censées s'inscrire.

Notes

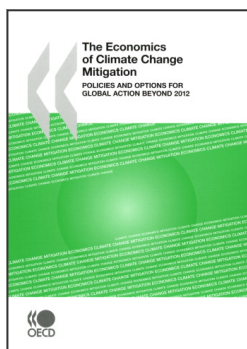
1. Voir Armington (1969).
2. Au niveau sectoriel, les fonctions spécifiques d'accumulation peuvent être différentes du fait que la demande de capital (ancien et nouveau) pourra être inférieure au stock amorti de capital ancien. Dans ce cas, le secteur se contracte dans le temps en se débarrassant du capital ancien. Par conséquent, pour chaque période, la nouvelle génération de capital disponible pour les secteurs en expansion est égale à la somme du capital désinvesti dans les secteurs qui se contractent plus l'épargne totale générée par l'économie.
3. La simulation de référence repose également sur l'hypothèse que le système de permis d'émissions de l'UE sera mis en œuvre au cours de la période 2006-12, avec un prix des permis qui passera progressivement de 5 à 25 USD constants en 2012 et au cours des années ultérieures.
4. Pour cette phase de calibrage, tous les prix avant impôts sont normalisés à l'unité, ce qui fait qu'il est possible, entre autres, de faire en sorte, au moyen de fonctions duales de coût, que la somme des coefficients de la fonction de production CES soit égale à l'unité.
5. Par exemple, les différences de prévisions des prix de l'énergie dans le scénario de référence peuvent se répercuter sur le coût économique d'un scénario, mais marginalement. En ce qui concerne l'analyse de sensibilité au scénario de base, voir OCDE (2006).

6. Par exemple, dans le scénario de référence, le progrès technique incorporé dans le facteur travail est calibré de manière à reproduire certaines tendances d'évolution du PIB. En revanche, pour toute variante, le PIB est totalement endogène en raison de ce progrès technique calculé dans le scénario de référence.
7. On n'a pas pris en compte les émissions de gaz autres que le CO₂ dus aux brûlis de forêts et savanes. Elles représentent moins de 5 % des émissions totales de gaz autres que le CO₂ selon l'EPA des États-Unis.

Références

- Achard, F., H.D. Eva, P. Mayaux, H.-J. Stibig et A. Belward (2004), "Improved Estimates of Net Carbon Emissions from Land Cover Change in the Tropics for the 1990s", *Global Biogeochem. Cycles*, Vol. 18.
- AIE (2004), *Prospects for CO₂ Capture and Storage*, Paris.
- AIE (2006), *World Energy Outlook 2006*, Paris.
- AIE (2008), *World Energy Outlook 2008*, Paris.
- Armington, P. (1969), "A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production," *IMF Staff Papers*, Vol. 16, pp. 159-178.
- Arnberg, S. et T.B. Bjorner (2007), "Substitution Between Energy, Capital and Labour Within Industrial Companies: A Micro Panel Data Analysis", *Resource and Energy Economics*, 2007, Vol. 29, No. 2, pp. 122-136.
- Burniaux, J-M. (2000), "A Multi-Gas Assessment of the Kyoto Protocol", *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, No. 270.
- Burniaux, J-M., G. Nicoletti et J. Oliveira Martins (1992), "GREEN : un modèle global pour chiffrer les coûts des mesures de réduction des émissions de CO₂", *Revue économique de l'OCDE* 19 (hiver).
- Dimaranan, B.V., Editor (2006). *Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 6 Data Base*, Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
- Dowrick, S., Y. Dunlop, et J. Quiggin (2003), "Social Indicators and Comparisons of Living Standards", *Journal of Development Economics*, 2003, Vol. 70.
- Duval, R. et C. de la Maisonneuve (2009), "Long-Run GDP Growth Framework and Scenarios for the World Economy", *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, No.663, à paraître.
- Hyman, R.C., J.M. Reilly, M.H. Babiker, A. De Masin, et H.D. Jacoby (2002), "Modeling Non-CO₂ Greenhouse Gas Abatement", *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 8, No. 3, pp. 175-86.
- Krugman, P. (1989), "Differences in Income Elasticities and Trends in Real Exchange Rates", *European Economic Review*, Vol. 33, No. 5.

- Lee, H-L. (2002), “An Emission Data Base for Integrated Assessment of Climate Change Policy Using GTAP”, *Draft GTAP Working Paper*, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- OCDE (2005), “Les échanges et l’ajustement structurel”, Paris.
- OCDE (2006), “Sensitivity Analysis in ENV-Linkages”, *ENV/EPOC/GSP(2006)6*, Paris.
- OCDE (2008), *Perspectives de l’environnement de l’OCDE à l’horizon 2030*, Paris.
- US EPA (2006a), “Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020”, US Environmental Protection Agency, Washington D.C., juin, version révisée.
- US EPA (2006b), “Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases”, US Environmental Protection Agency, Washington D.C., juin.
- van der Mensbrugge, D. (2005), “Linkage Technical Reference Document Version 6.0”, Development Prospects Group, Banque mondiale, Washington, janvier 2005.
- Weyant, J. et F. de la Chesnaye (dir. publ.) (2006), “Multigas Mitigation and Climate Change”, *Energy Journal*, numéro spécial.



Extrait de :

The Economics of Climate Change Mitigation

Policies and Options for Global Action beyond 2012

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/9789264073616-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2010), « Annexe 2 : Aperçu du modèle de l'OCDE ENV-Linkages », dans *The Economics of Climate Change Mitigation : Policies and Options for Global Action beyond 2012*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264073913-12-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.