



**Modèle macro-économique à dominante agricole
pour l'analyse de l'impact du changement climatique
et des effets des politiques en terme d'efficacité et d'équité**

Version abrégée du rapport de fin d'étude au GICC, février 2002

Ont participé à ce travail dont la coordination a été assurée par
Françoise Gérard, Marie-Gabrielle Piketty et Jean-Marc Boussard

Jean-Marc Boussard, directeur de recherche à l'INRA
Ane-Kathrine Christensen, ingénieur à SIGMA
Abigaïl Fallot, économiste au CIRAD
Françoise Gérard, économiste au CIRAD
Marie-Gabrielle Piketty, économiste au CIRAD
Tancrède Voituriez, économiste au CIRAD
Caroline Desalos, stagiaire à l'Institut supérieur agronomique, Beauvais
Nicolas Maunier, stagiaire à l'Université Paris X
Véronique Provo, stagiaire à l'Institut des Hautes Etudes Internationales

A) Introduction :

a) Les problèmes politiques posés par l' « effet de serre » : les objectifs initiaux du projet

L'« effet de serre » et les mesures prises pour en éviter les conséquences sont de nature à bouleverser l'économie mondiale, non seulement par leurs effets physiques directs, mais encore (et sans doute surtout) par leurs suites économiques indirectes, engendrées par les stratégies des agents économiques en réponses aux premiers. Par exemple, les idées négociées à la conférence de Kyoto sur l'instauration de quotas négociables d'émission de CO₂ sont évidemment susceptibles d'affecter certains prix de base, tant dans le secteur agricole que dans le secteur énergétique. On peut s'interroger sur l'ampleur et le sens de ces mouvements de prix, ainsi que sur leurs effets redistributifs, et, finalement, sur leurs conséquences pour la croissance mondiale.

Celles-ci, évidemment, seront fort différentes selon les modalités de la mise en oeuvre de cette politique mondiale des quotas de pollution, en particulier selon que les quotas seront attribués sur la base des « droits acquis » (proportionnellement aux niveaux de pollution actuels), ou sur des bases « équitables » (par tête d'habitant). Mais en vérité, on ne sait pas où se situera la différence. Dans chacun des deux cas, il existe des arguments pour dire que la solution en question est « bonne pour la croissance » (et l'Humanité), ou qu'elle doit conduire à la catastrophe. Dans chacun des deux cas, le bouleversement des prix mondiaux sera tel que toute évaluation en termes de « coûts » de type comptable (Somme de quantités pondérées par des prix supposés invariants) sera simplement futile.

Il ne s'agit-là que d'un exemple entre beaucoup des problèmes posés par la coexistence de la globalisation de l'économie, d'une part, et du caractère planétaire de certains phénomènes environnementaux, d'autre part. Beaucoup de questions analogues se posent dans des domaines voisins, par exemple, celui des déchets nucléaires. On peut se demander jusqu'à quel point la réticence actuelle des gouvernements à les aborder ne vient pas justement de l'impossibilité dans laquelle ils se trouvent d'examiner les conséquences à long terme des réponses qui pourraient y être apportées.

b) Les réponses apportées par les modèles d'équilibre général et leurs insuffisances

Il existe pourtant des instruments pour traiter ce type de problème, des instruments qui ont été utilisés à grande échelle dans les années récentes pour l'élaboration des politiques économiques nationales, et dont on ne voit pas pourquoi ils ne pourraient rendre des services analogues au plan mondial. Ce sont les « modèles d'équilibre général ».

Ce mot de « modèle d'équilibre général » recouvre en fait une très grande variété d'outils divers, plus ou moins frustes, plus ou moins dynamiques ou statiques, plus ou moins exigeants en données, reposant sur un vaste éventail de fondements théoriques. Tous, cependant, ont en commun les points suivants :

- a - Ils supposent les marchés en équilibre à tout instant, sinon *ex ante* (les quantités et les prix anticipés ne sont pas forcément compatibles) du moins *ex post*.
- b- Ils supposent les agents économiques rationnels, et leur comportement pouvant être prévu par une optimisation

- c- Ils distinguent dans l'économie différents secteurs de production, et différentes institutions qui consomment, souvent différentes sortes de ménages (les « pauvres » et les « riches » par exemple).
- d- Une partie importante des données qu'ils utilisent vient de la comptabilité nationale détaillée, en particulier les « matrices de comptes sociaux » mises à la mode par les institutions internationales.

Il existe cependant, une grande variété de modèles de base. Ceux-ci diffèrent d'abord par le degré de détail dans la décontraction des agrégats nationaux, mais, bien plus encore, par la façon dont sont envisagés les problèmes dynamiques, et les anticipations. Ceci entraîne que la disposition d'un seul de ces modèles, ou d'un nombre réduit d'entre eux, n'est sûrement pas suffisant pour prétendre - par une interprétation abusive de la notion de division du travail scientifique - qu'il suffit de le faire fonctionner pour examiner toutes les conséquences des politiques envisagées ci-dessus. De même qu'un seul « modèle climatique » s'est révélé être insuffisant pour répondre à la question de savoir si l'« effet de serre » correspondait ou non à une réalité physique, de même un seul modèle économique mondial sera insuffisant pour examiner toutes les conséquences des accords de Kyoto et de leurs suites. Pour avoir une opinion à ce sujet, il faut que la communauté politico-scientifique mondiale puisse réfléchir aux mêmes scénarii vus sous des angles différents par des modèles différents.

Ce point est d'autant plus important qu'il existe pour l'instant, à notre connaissance, peu de modèle de l'économie mondiale préparé spécifiquement pour étudier ces questions¹. Ceux qui sont spécialisés dans l'effet de serre ne s'intéressent pas à l'agriculture, ou ne s'y intéresse que de très loin, parce que les auteurs ne sont pas spécialistes de ce sujet. Or l'agriculture et la forêt jouent un rôle majeur dans l'effet de serre. Ceux qui s'intéressent à l'agriculture² sont des sous-produits de la problématique de l'« Uruguay Round ». Ils ont été construits et mis en oeuvre par le Département d'Etat des USA et les organisations internationales qui lui sont liées dans le but avoué de promouvoir le libre échange, et d'en évaluer les bénéfices. Mais ils ne s'intéressent pas à l'effet de serre.

Dans tous les cas, le principal défaut des modèles existants est de reposer sur une dynamique très fruste, dans laquelle les problèmes de risque et d'incertitude sont évacués au nom de l'hypothèse des « anticipations rationnelles », ce qui est de nature à fausser grandement toutes les estimations relatives à l'accumulation du capital, et à la répartition sectorielle des investissements. Il est évident que ces défauts sont extrêmement fâcheux dans un modèle axé sur les rapports entre le court et le long terme. On sait en effet que les marchés, en général, traitent très efficacement les problèmes du court terme, mais beaucoup plus mal ceux du long terme. Pour résoudre les problèmes à long terme, une dynamique moins fruste

¹ Cependant, voir les projets de l'OCDE (conférence du 17 septembre 1998), le projet AIM de l'Université Batelle, le modèle GREEN de l'OCDE, le programme néerlandais ETSAP, etc... En particulier le modèle développé par McKibbin, Shakleton et Wilcoxon (1998) ainsi que le modèle MERGE (Manne et Richel, 1998) sont typiques des modèles que nous critiquons ici.

² On pense ici essentiellement à GTAP (Hertel *et al.*, 1997) et à RUNS (Goldin et Knudsen, 1990), venus après les travaux sur le modèle WALRAS à la Banque Mondiale (Burniaux, 1988). Un autre de ces modèles est ORANI, construit par une équipe australienne, pour représenter l'économie de ce pays, cf Vincent, Dixon et Powel (1980), ou Dixon, Parmenter, *et al.* (1980), mais qui a produit aussi un « enfant » mondial, ORANIG. Il existe aussi d'autres modèles d'équilibre général (par exemple à la FAO, cf FAO 1997), ou partiels (en particulier, à l'IFPRI, cf Agcaoli, Rosegrand *et al.*, 1995), mais qui nous intéressent moins ici. On trouvera une revue assez complète de ces modèles chez Boussard (1998).

que celle des modèles courants, en particulier, qui tiennent compte du risque, est nécessaire. Cela justifie notre entreprise de construire un modèle alternatif.

c) Le modèle à construire

En réaction contre les insuffisances qui viennent d'être soulignées, le modèle dont il est rendu compte ici devait se caractériser par les traits suivants :

i – L'attention devait se porter sur les interactions réciproques entre l'évolution des différents secteurs de l'économie, en mettant l'accent sur les secteurs énergétiques et agricoles.

ii – Ce devait être un modèle dynamique³ récursif dans lequel les anticipations ne seraient pas forcément "rationnelles".

iii – Ce devait être un modèle qui, en conséquence, devait tenir compte explicitement du risque.

iv – Ce devait être un modèle de petites dimensions, basé sur les données existantes, afin de ne pas coûter trop cher, mais dans lequel l'accent devait être mis sur les ressources naturelles, en particulier la terre et l'eau.

v – Ce devait enfin être un modèle dans lequel les coûts de transports entre les pays, en fonction des surfaces et densités de population ne devaient pas être ignorés.

d) Valorisation attendue

L'intérêt majeur du projet était de donner aux français un "ticket d'entrée" relativement bon marché pour le "Club des grands" dans les négociations internationales sur le sujet. Il est clair en effet, que dans une partie comme celle qui s'enclenche autour des négociations de Kyoto, les négociateurs qui pourront arguer d'un modèle sophistiqué pour appuyer leurs affirmations, ou pour contrer celles des autres, bénéficieront d'un avantage considérable par rapport à ceux qui devront se contenter de prendre acte des "dires d'experts" parfois intéressés ou "télécommandés".

Pour que cette initiative ait l'impact cherché, il fallait donc que le projet bénéficie d'une diffusion toute spéciale auprès des négociateurs français et européens dans les instances qui débattent du problème. On avait donc envisagé d'organiser des stages de formation et des "scénarios en temps réel". L'équipe Ecopol bénéficie d'une grande expérience en la matière, acquise dans la diffusion du modèle MATA.

A côté de cela, il est clair que l'originalité de l'introduction du risque dans les modèles d'équilibre général donnera lieu à des articles dans des revues à comité de lecture telles que World development, Journal of Economic behaviour and organization, American Journal of agricultural Economics, etc...

B) Résumé étendu : ce qui a été fait

³Le mot "dynamique" peut s'entendre de bien des façons. En particulier, il existe une légende selon laquelle s'opposeraient

i - les "vrais" modèles dynamiques, qui seraient ceux qui élaborent la totalité des plans d'un décideur sur un horizon de planification peut être infini, à partir de formules d'actualisation, et,

ii - les "faux" modèles dynamiques, versions commodes, mais dégradées des précédents, qui se contentent de prévoir la situation au temps t à partir de la situation en $t-1$.

En réalité, comme le montre par exemple DAY (1963), les deux ne sont nullement contradictoires et bien plutôt complémentaires : il est tout à fait raisonnable de faire des plans pour l'intervalle de temps $(t, t+n)$ à partir de l'information disponible en $t-1$, puis de réviser ces plans pour la période $(t+1, t+n+1)$ si de l'information « fraîche » survient au temps t . En fait, en $t-1$, il est seulement nécessaire de prendre des décisions pour t , mais, pour cela, il peut être nécessaire de préparer des plans provisoires pour jusqu'à $t+n$. Cf Modigliani et Hohn (1954).

L'équipe qui a réalisé les travaux était composée des personnes indiquées en couverture. Elle a réalisé pour l'essentiel ce qui était prévu : un modèle à 12 pays et 14 secteurs, qui tourne à peu près correctement, et dont on trouvera le listing en annexe du rapport principal. Ce modèle a été réalisé à partir des données de la base de donnée GTAP, mais en traitant ces données publiques d'une façon très originale. Auparavant, une « maquette de la maquette » avait été réalisée, et fournie un micro-modèle fondé sur des données fantaisistes, sans ventilation géographique, mais qui tourne vite, et qui, de ce fait, pourrait constituer un matériel pédagogique de grande valeur.

Comme prévu, ce modèle tient raisonnablement compte des interactions entre secteurs, il est de petite dimension (encore que, sur ce point, nous ayons été obligé de préparer plusieurs versions du modèle pour satisfaire à nos exigences, que les versions vraiment « petites » ne sont pas suffisantes pour répondre aux questions, tandis que les versions « grandes » sont trop gourmandes en temps de calcul), il tient compte du risque et des coûts de transport, il est dynamique, il sépare les ménages en « riches » et « pauvres » et il ne coûte pas cher. Il ne traite pas de l'eau, comme on l'avait espéré. Cependant, des travaux de recherches de données ont été effectuées pour cela, et la prise en compte de cet aspect des choses se fera sans nul doute bientôt.

Quelques données « fraîches » ont été élaborées pour l'occasion. Il s'agit d'abord des données relatives aux « ménages », qui ont été ventilées dans chaque pays entre « riches » et « pauvres » -ce qui n'est pas fait dans la base GTAP. On espère par là faire apparaître les conséquences des mesures contre l'effet de serre pour la répartition des revenus.

De même, on a ventilé, conformément aux standards GTAP, les données disponibles sur les émissions, ce qui a représenté un assez gros travail, et permettra de contrôler la validité des travaux effectués parallèlement par les Américains sur cette base.

La comparaison des résultats obtenus avec la réalité observée au cours des dix dernières années permet de donner un minimum de crédibilité aux « faits stylisés » extraits de ce modèle. Il est important, de ce point de vue, de noter que ce modèle est l'un des rares de son espèce, du fait de ses caractéristiques dynamiques, à pouvoir subir cette épreuve de la comparaison avec des chiffres relevés dans des annuaires statistiques.

Des comparaisons systématiques ont été effectuées entre les résultats du modèle et les fluctuations de variables économiques réelles au cours des années 1995-2000. Si le modèle n'a pas de prétentions à « prévoir » ces variables dans le détail, du moins l'ordre de grandeur des fluctuations est-il satisfaisant.

Enfin, les résultats de ce modèle a été comparé avec ceux des modèles « standards ». Comme eux, il prévoit bien que l'imposition de limites mondiales aux émissions de gaz à effet de serre présenterait une charge essentiellement pour les « Américains riches ». Cependant, les résultats diffèrent lorsqu'on envisage des scénarii de libéralisation des échanges. Tandis que les modèles standards prévoient dans ce cas un bénéfice énorme pour tout le monde, et en particulier les « riches du Tiers monde », notre modèle conclut à des résultats beaucoup moins optimistes, avec, selon les années, des pertes sévères pour les « pauvres du Tiers monde », et des gains modestes pour les Européens.

En revanche, il est vrai que le modèle n'est pas encore en état d'être vulgarisé, et proposé sur Internet comme un « jeu vidéo » -ce qui avait été envisagé à l'origine. Beaucoup de travail reste à faire pour cela, même si cela reste au fond l'objectif ultime. De même, des sessions de formation à son usage n'ont pas encore été organisées. Cependant, un livre et des articles de journaux sont en préparation pour valoriser ce travail.

C) Méthodologie et modèles

Comme prévu, le modèle est un modèle dynamique récursif, avec zoom sur le secteur agricole. De ce fait, il est susceptible d'engendrer des séries chaotiques, ce qui, après tout, ne fait que le rendre plus réaliste⁴.

C.1 - Caractéristiques générales du modèle

10 secteurs⁵/ sont considérés dont 5 concernent directement la production agricole et sylvicole et deux les activités de transformations associées à ces productions (encadré 1). Le critère qui a présidé à cette nomenclature est simple : il s'agissait de faire en sorte d'avoir un minimum d'homogénéité entre les secteurs pour les variables du modèle qui nous intéressent dans le cadre de cette étude. De ce point de vue, le degré de détail accordé au secteur agricole est une originalité importante de ce modèle afin de se faire une idée des conséquences du protocole de Kyoto sur la sécurité alimentaire.

- Pour ce faire, deux types de ménages seront considérés. Ce sont en effet les populations à revenus faibles ou moyens qui risquent d'être le plus touchées par le changement climatique si celui-ci se traduit par une croissance des événements extrêmes, susceptibles d'accroître l'instabilité des prix des produits alimentaires. Nous aurions souhaité être à même de diviser la population en 2, à la médiane des revenus par exemple. Cependant peu de données, à part les seuils de pauvreté, sont disponibles dans les statistiques internationales.

Encadré 1 : les secteurs

- riz
- autres céréales
- autres productions agricoles
- produits animaux
- produits forestiers
- industrie agroalimentaire
- industrie du bois
- autres industries
- services
- énergie, ressources

Outre les consommations intermédiaires, la production requiert des facteurs, **5 types de facteurs de production** sont distingués dans le modèle, ils sont supposés partiellement substituables et diffèrent par leur mode de renouvellement/usure, leur mobilité entre secteurs et leurs prix. Le capital est immobile entre les secteurs, afin de refléter la difficulté à

⁴ Cf. Day, Chavas, Grandmont. En particulier, Day (1994) s'interroge sur le peu de place de ces travaux dans la littérature académique.

⁵ La base de données GTAP de 1995 a été utilisée. L'annexe 1 décrit dans le détail le processus d'agrégation et les différentes hypothèses réalisées.

transformer des équipements spécifiquement conçus pour un type d'activité afin de les utiliser pour une autre. Seuls la dépréciation et l'investissement modifient ainsi la dotation initiale. La main d'œuvre non qualifiée ou qualifiée est commune à l'ensemble des activités agricoles et peut ainsi être affectée librement à l'une ou l'autre de ces activités de production en fonction des rentabilités relatives. Pour les activités non agricoles, la main d'œuvre non qualifiée disponible est spécifique à chaque secteur d'activité et s'ajuste en fin de période en fonction des perspectives anticipées que la branche offre aux salariés. Pour la main d'œuvre qualifiée, elle est allouée librement entre les industries de transformations (industries alimentaires, du bois ou manufacturière) et est spécifique pour les branches services et énergie-ressources. On prend ainsi en compte une mobilité partielle des salariés sur le marché du travail. L'offre de travail varie d'une année sur l'autre en fonction des rémunérations espérées et d'une élasticité de substitution, reflétant les coûts de transactions associés au changement de branche d'activité.

La terre n'est utilisée que pour les activités agricoles et est allouée librement entre ces activités. En principe, il aurait fallu distinguer les cultures annuelles, où cette hypothèse est justifiée, des cultures pérennes où la décision de planter implique une utilisation de la terre pendant plusieurs années, la seule décision étant la récolte, comme cela est fait dans RUNS (Van den Mensbrughe, 1998). Cependant, ceci compliquant considérablement la représentation du processus de production, il a été décidé d'utiliser une représentation simplifiée dans un premier temps.

Les ressources naturelles sont utilisées par l'agriculture, la forêt et la branche énergie ressources.

Encadré 2 : les facteurs de production

- terre
- ressources naturelles
- main d'œuvre qualifiée
- main d'œuvre non qualifiée
- capital

Enfin, le modèle pourrait être construit soit en considérant le monde comme une seule unité, soit en prenant en compte différentes « régions », ou groupes d'état. Nous sommes partis d'un modèle à une région, progressivement compliqué pour avoir un modèle à 3 puis à 12 régions (cf. encadré 3).

Encadré 3 : Les régions du modèle

Modèle 3 régions :

USA
Europe
Reste du monde

Modèle 12 régions :

1. L'ex-URSS et l'Europe de l'Est
2. Le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord
3. L'Afrique du Sud du Sahara
4. L'Europe des quinze
5. L'Amérique latine avec : Argentine, Brésil, Mexique, Chili, Uruguay, Venezuela, Colombie, le reste de l'Union andéenne, Amérique centrale et Caraïbes
6. Les USA et le Canada
7. L'Australie et la nouvelle Zélande
8. L'Asie développée avec : Honk-Kong, Japon, Corée, Taïwan et Singapour
9. L'Asie du Sud Est avec : Indonésie, Malaisie, Philippines, Thaïlande, Viet Nam
10. L'Asie du Sud : Inde, Sri Lanka et le reste de l'Asie du Sud
11. La Chine
12. Le reste du monde

C.2 - Fonctionnement du modèle

Le modèle fonctionne sur un pas de temps annuel et est divisé en deux modules : le premier décrit le processus de production physique de biens et services, l'utilisation des facteurs de production, la distribution des revenus et la consommation ; le second, les opérations financières : flux de capitaux entre nations, déterminés par l'épargne domestique et le solde commercial et l'allocation des investissements entre les différents secteurs d'activité, en fonction des rentabilités espérées du capital et du risque associé dans les différentes branches de l'économie domestique.

- Dans le **premier module** :

On calcule l'équilibre sur le marché domestique de deux façons différentes selon qu'il s'agit ou non d'un produit agricole. En effet, on suppose que les décisions de production sont prises un an avant la mise sur le marché pour les produits agricoles. Si bien que **l'offre** d'importation, qui s'ajuste immédiatement aux prix, s'ajoute à une offre domestique fixée. La production agricole est ainsi déterminée sur la base de prix anticipés, ce qui génère une demande immédiate en consommation intermédiaire, un niveau d'utilisation des facteurs et un prix pour ceux-ci. Au contraire, pour les biens non agricoles l'offre est vendue immédiatement, elle se détermine donc en fonction des prix d'équilibre et il n'y a pas de possibilités d'erreur d'anticipation. Dans les deux types de bien, agricole ou non agricole, les produits font face à la même **demande** : demande finale des détenteurs de facteurs de

production, c'est à dire les salariés (liée à leur rémunération courante ou à celle de la période précédente selon les versions), et les détenteurs de capitaux (liée à leur rémunération à la période précédente), terre et ressources naturelles ; demande de biens d'investissement (déterminée par les résultats du second module, l'année précédente) et la demande d'exportation.

Le commerce international est représenté, de façon extrêmement classique par une armington pour les importations, les exportations des uns étant définies comme les importations des autres. On ne considère donc que des transactions bilatérales, chaque produit étant supposé légèrement différent selon son lieu de production, déterminée par le niveau des prix relatifs et les paramètres de préférence. Le taux de change est exogène à ce module.

- Dans le **second module** :

On déduit du module 1, le niveau des investissements pour la période suivante, somme de l'épargne domestique et étrangère. L'épargne étrangère est calculée afin de compenser le déficit commercial.

Les résultats économiques réels de chaque branche d'activité pour la période $t-1$ ne peuvent être calculés qu'en fin de période t . En effet, les décisions du module 1 ont été prises sur la base d'anticipations de prix et les prix réels auxquels sont vendus les produits ne sont connus qu'une période plus tard. Ce n'est donc qu'une période plus tard que la rémunération réelle du capital peut être calculée. Cela est fait de façon résiduelle, en soustrayant l'ensemble des coûts de production à la valeur de la production. La rentabilité du capital dans les différents secteurs de l'économie et le risque associé, calculé comme la différence entre la rentabilité anticipée et la rentabilité réelle, permet le calcul de l'allocation de l'investissement entre les différents secteurs, par une maximisation du profit attendu des investisseurs, conforme à la formule de Markovitz (1970).

Dans cette version, encore simplifiée, les taux de change sont exogènes. Il est prévu de réaliser un module capital beaucoup plus élaboré où, comme c'est le cas dans le modèle théorique, les taux de change et les taux d'intérêt sont endogènes, fonction de l'offre et de la demande de monnaie. Cependant, les problèmes de convergence nous ont conduit à remettre à plus tard cette amélioration.

Il s'agit d'un modèle en dynamique récursive, avec un pas de temps annuel. Chaque période est reliée à la précédente par l'offre de produits agricoles, les revenus décalés, la détermination des anticipations de prix et de variance, ainsi que de rentabilité du capital, la mobilité des salariés entre branches, en fonction des rémunérations et la croissance démographique. Par ailleurs, les niveaux d'émission sont comptabilisés et accumulés.

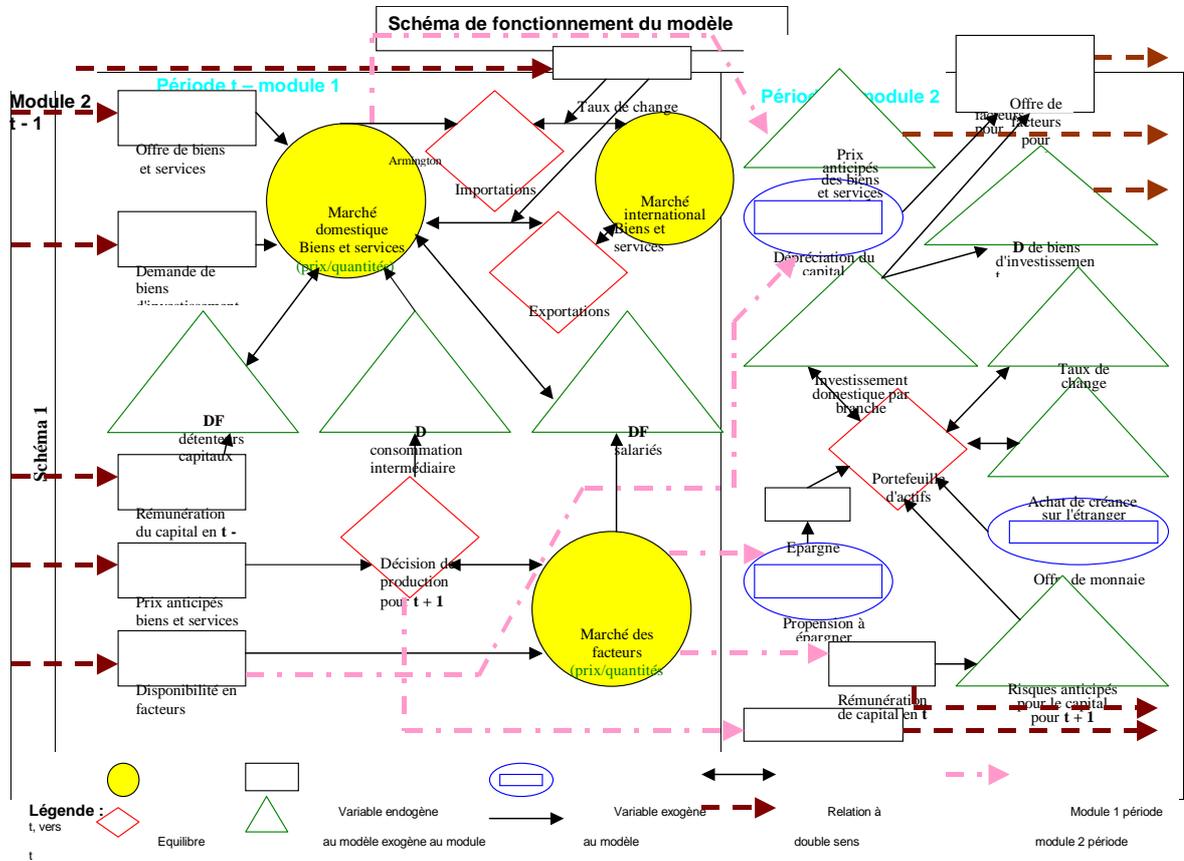


Figure 1 : Schéma général du modèle récursif

La figure 1 résume le fonctionnement du modèle: chaque période t (année ou demi-année, en fonction des besoins) est divisée en deux modules, résolus successivement.

- le premier retrace les opérations physiques, le second les opérations financières ;
- A l'issue du second module, on peut ainsi calculer la demande en biens d'investissement et l'offre de facteurs pour la période suivante, ainsi que le taux de change, les prix anticipés et le risque associé à chaque secteur d'activité.;
- les biens capitaux et la main d'œuvre utilisée sont spécifiques à chaque secteur, il y a un ajustement de la main d'œuvre à la fin de chaque période en fonction des rémunérations relatives.

On a ainsi un modèle d'équilibre général, en dynamique récursive, où certains marchés sont en équilibre alors que d'autres sont contraints par les quantités (théorie du déséquilibre)

C.3 - Les différentes versions

Les problèmes de convergence dont il a été question en introduction nous ont amenés à réaliser plusieurs versions du modèle. C'est la version la plus satisfaisante qui est décrite dans le rapport complet en annexe. Il nous a cependant semblé que, comme la mise au point de ces versions respectives faisait partie du processus de recherche, et qu'elles résument les principaux choix nécessaires à l'élaboration de ce type de modèle, il était utile d'en dire un mot ici.

Dans la première version réalisée, la fonction de production était « Léontieff » pour les consommations intermédiaires, ce qui signifie qu'aucune substitution n'était possible entre ces dernières et les facteurs. Afin de donner plus de flexibilité au système, la version actuelle considère que la production est représentée par une fonction CES entre les consommations intermédiaires et les facteurs. Cette modification n'a pas eu beaucoup d'impact sur la convergence, ni plus généralement sur les résultats.

Un autre aspect, ayant généré plusieurs versions complémentaires du modèle concerne les productions pour lesquelles on considère que l'offre est décalée d'une période. Dans la première version du modèle, on avait supposé que c'était le cas pour l'ensemble des 10 secteurs. Face aux problèmes de convergence que nous rencontrions, nous avons voulu vérifier qu'ils étaient bien générés par cette caractéristique du modèle et nous avons donc réalisé une version « classique », où l'offre s'ajuste instantanément aux prix pour tous les secteurs. Cette version n'a effectivement pas de problème de convergence. Enfin, comme il nous semblait que ce décalage dans l'offre permettait de distinguer astucieusement la production agricole du reste de l'économie, nous avons gardé cette caractéristique pour les seules productions agricoles et sylvicoles.

Un autre élément, important pour la détermination de la situation de référence, concerne la représentation des politiques économiques. Pour les politiques agricoles, la base de données GTAP utilise les équivalents subventions de l'OCDE si bien que l'ensemble des mesures, quelles soient ou non quantitatives, sont transformées en équivalent tarifaire. Ainsi un prix garanti est transformé en une taxe sur les importations et/ou une subvention sur les exportations. Comme l'un des problèmes posés par la situation de référence est qu'elle est trop instable par rapport à la réalité et que le risque joue un rôle important dans cette évolution, nous avons tenté de représenter pour l'Europe les politiques réelles : prix garantis, accompagnés ou non de quotas.

Un autre élément donnant lieu à plusieurs versions est la mobilité des facteurs entre secteurs et la prise en compte de prix endogène ou exogène pour les facteurs de production, avec des interventions éventuelles de la puissance publique sur la détermination de ces rémunérations.

C.4 - Les données

Dans un exercice tel que celui qui est décrit ici, les données ont une double fonction : d'un côté, elles servent à associer des valeurs numériques réelles aux paramètres du modèle. De l'autre, elles servent aussi de points de comparaison, pour vérifier que les résultats correspondent bien à quelque chose « qui ressemble à la réalité » (faute de quoi, l'exercice serait évidemment vain !). Les deux séries de données sont bien entendu différentes. Mais elles ont en commun d'être est tout aussi difficile de trouver les unes que les autres.

C.4.1 – Les données servant aux paramètres du modèle

Elles viennent pour l'essentiel de la base de données GTAP, qui est un ensemble de « comptes sociaux » au niveau mondial, avec une désagrégation géographique. Ces données souffrent de nombreuses insuffisances, c'est bien connu dans la profession, mais elles ont le mérite d'exister, et nous les avons prises telles quelles. Il a seulement été nécessaire, dans certains cas ⁶, de les « agréger », c'est-à-dire de regrouper ensemble les données de différentes activités ou de différents pays, pour en faire une seule activité, ou un seul pays. Cependant, des données « fraîches » ont été ajoutées à cette base, pour permettre au modèle de donner des résultats sur l'effet de serre, et de décrire les contraintes en disponibilité en eau.

En ce qui concerne l'eau, l'énorme variabilité des prélèvements, pour des activités équivalentes, en fonction de la source des estimations et de la région du monde concernée est un handicap sérieux pour relier activités économiques et consommation en eau. Par ailleurs on distingue généralement les prélèvements de la consommation, une partie de l'eau prélevée n'étant pas consommée et retournant ainsi dans le cycle hydrologique.

Le même problème existe pour la production agricole. On a ainsi des différences de l'ordre de 50% pour la consommation en eau du riz en fonction des estimations. Même dans le cadre de nos objectifs, où l'on souhaite simplement voir si l'eau apparaît comme un facteur contraignant sur les activités économiques, de telles différences enlèvent tout sens à l'exercice. C'est pourquoi, dans l'état actuel des choses, nous n'avons pas rajouté explicitement de contrainte de disponibilité en eau dans le modèle, pensant qu'il y avait des tâches plus urgentes à réaliser, mais en gardant ce problème en mémoire, car il est clair que le problème se pose.

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, elles sont ici rapportées aux niveaux de production et à la consommation finale des ménages, exprimés en millions de dollars US de 1995, tels que fournis par la base de données GTAP. Il s'agit donc de « tonnes d'équivalent carbone par unité de volume d'activité », le volume d'activité étant mesuré en 10^6 \$ 1995 (on prend comme unité de quantité de produit le « nombre de tonnes de produit que l'on peut acheter avec 10^6 \$).

C.4.2 – Les données nécessaires à la vérification du modèle

Les données GTAP, utilisées pour réaliser ce modèle, ne concernent qu'une seule année, appelée « année de base » et pour laquelle une photographie instantanée de l'économie

⁶ En particulier, pour réaliser le modèle d'essai à trois pays.

mondiale est offerte. Comme l'outil que nous avons conçu est dynamique et récursif, il est nécessaire de donner une dimension chronologique, aussi bien aux données qu'aux résultats. Cela exige de collecter un certain nombre d'information sur l'évolution année après année des différentes variables.

Les statistiques démographiques sont utilisées pour représenter la croissance de la population. Celle-ci est considérée comme exogène, on applique donc un taux de croissance, issu des statistiques internationales, et on ne tient pas compte du fait que celle-ci dépend en réalité du niveau de revenu. La croissance générale de la population est utilisée dans les fonctions de demande, afin que les consommations minima prennent en compte ce phénomène, tandis que la croissance de la population active est utilisée pour permettre l'accroissement de la main d'œuvre disponible, qualifiée et non qualifiée. Là encore, on suppose qu'il s'agit de variables exogènes et on applique un taux uniforme aux facteurs « travail qualifié » et travail « non qualifié ».

Afin d'avoir une idée générale de l'évolution des économies en dynamique, les statistiques du PIB des différentes régions offrent un indicateur synthétique des performances économiques globales des différents pays. Au cours de la décennie 1990, des performances remarquables ont été réalisées par la région Asie du Sud Est et Chine, les autres régions ayant eu une croissance beaucoup plus faibles, voir une stagnation. La crise financière asiatique, déclenchée par une panique sur le marché Thai lors de l'été 1997, affecte fortement les performances de la région Asie du Sud-Est et l'ensemble de la croissance mondiale se trouve infléchi, la Chine faisant exception.

Un déterminant essentiel de la croissance économique est la productivité des différents facteurs de production. Celle-ci est partiellement déterminée par le progrès technique et par l'investissement. Cette dernière variable joue ainsi un rôle majeur dans la croissance économique réelle comme dans le modèle. L'idéal pour notre objectif, aurait été de trouver des statistiques internationales concernant la productivité des différents facteurs utilisés dans la production, et le niveau d'investissement, par secteur et par régions du monde. Malheureusement on ne trouve pas ces variables par secteur dans les statistiques internationales. Il faut donc se contenter d'évaluer le niveau d'investissement de façon agrégée sur l'ensemble de l'économie à travers l'analyse de la FCBF (formation brute de capital fixe). Dans le modèle, l'investissement est directement déterminé par l'épargne, il apparaît donc comme une proportion fixe du PIB. Nous avons donc réalisé une série de graphique sur nos régions pour voir si cette hypothèse est vérifiée : c'est bien le cas dans l'ensemble. Toutefois, dans la réalité comme dans le modèle, une partie de l'épargne domestique est destinée à des investissements étrangers, si bien que la relation entre PIB et FCBF n'a aucune raison d'être constante. C'est bien ce que l'on observe sur les graphiques en annexe.

D) Résultats

Le résultat majeur de l'étude est un programme informatique donné en annexe. Il est cependant intéressant d'analyser les premiers résultats issus de la mise en œuvre du modèle dans une série de situations variées.

D.1 – Recherche d'une situation de référence

Comme cela a été expliqué précédemment, nous ne sommes pas encore totalement satisfait des résultats obtenus avec notre modèle. En particulier, les difficultés de convergence et le temps de résolution limitent grandement nos capacités à explorer l'ensemble de l'espace des solutions. Par ailleurs, la simplicité du module financier dans cette version, explique que les évolutions dynamiques ne peuvent être encore finement calibrées. Enfin, nos exigences en matière de calibration – retrouver des séries de volume des production, de prix et de valeurs ajoutées- conformes à celles que l'on observe dans la réalité, sont bien supérieures à celles de nombreux auteurs de modèles, pour lesquels le raisonnement en différence et la cohérence interne de l'outil suffisent à la validation.

Pourtant, si les modèles prennent effectivement une importance croissante dans les négociations, il devrait être soumis, comme tout bon outil, à la réfutation possible des hypothèses principales... C'est l'exercice auquel nous tentons de nous livrer ici. On trouvera ci-après quelques graphiques, obtenus à partir des résultats du modèle⁷. Ils concernent les prix et les quantités de quelques produits agricoles, les valeurs ajoutées par grand secteur d'activité et l'évolution des volumes de production industrielles et agricoles. Il s'agit de résultats très préliminaires, que seule la date de fin de ce contrat nous amène à publier tels quels. Il reste beaucoup de travail à réaliser pour les valider.

Les séries générées par le modèle semblent satisfaisante, du moins en première approche, en ce sens que les variables restent « quasi stationnaires » (ce qui est indispensable pour que ce modèle dynamique présente les propriétés de base du modèle statique correspondant), tout en présentant une distribution –en particulier, pour les prix- qui les fasse « ressembler » à des variables « réelles » (on sait bien que les prix réels sont fortement fluctuants, en particulier ceux des matières premières agricoles). Toutefois, sur longue période (siècle)le monde que nous représentons est visiblement atteint d'une déflation persistante. Par ailleurs certaines variables présentent encore une trop forte instabilité. Ces points ont été évoqués en introduction, nous sommes actuellement en train d'analyser les causes de cette évolution et de chercher les moyens d'y remédier. En particulier, il nous manque encore dans le modèle une tendance exogène de progrès technique, représentant les gains de productivité.

Les graphiques ci-après (figures 2 à 6) donnent une idée de la physionomie générale de ces résultats, obtenus tantôt avec le « modèle abrégé à trois régions », tantôt avec le « modèle complet à douze régions ».

⁷ Il s'agit d'une sélection. Des résultats plus détaillés se trouvent dans le rapport complet.

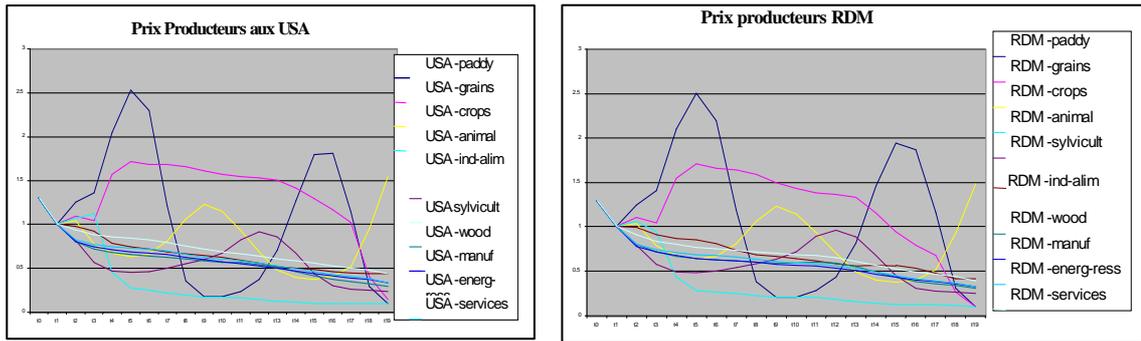


Figure 2 : Prix producteur (USA, et reste du monde) dans le modèle à trois pays.

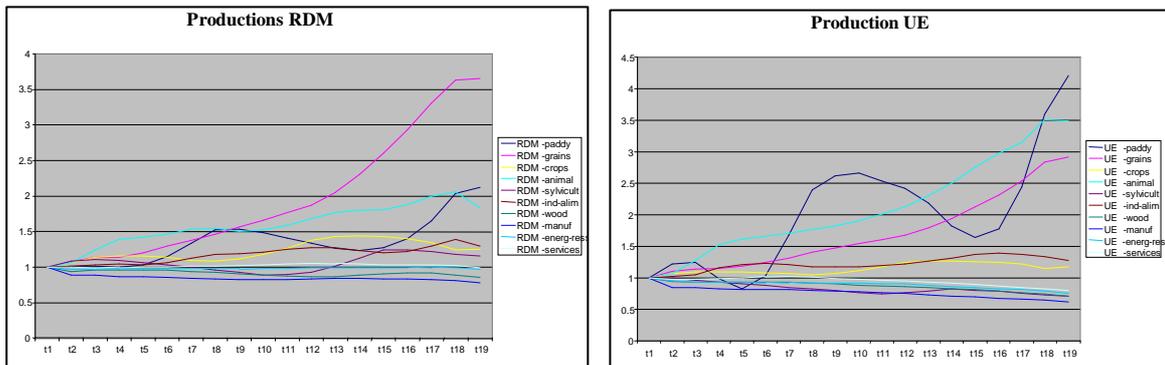


Figure 3 : Productions des différents secteurs, dans le modèle à trois pays, pour les USA et le reste du monde.

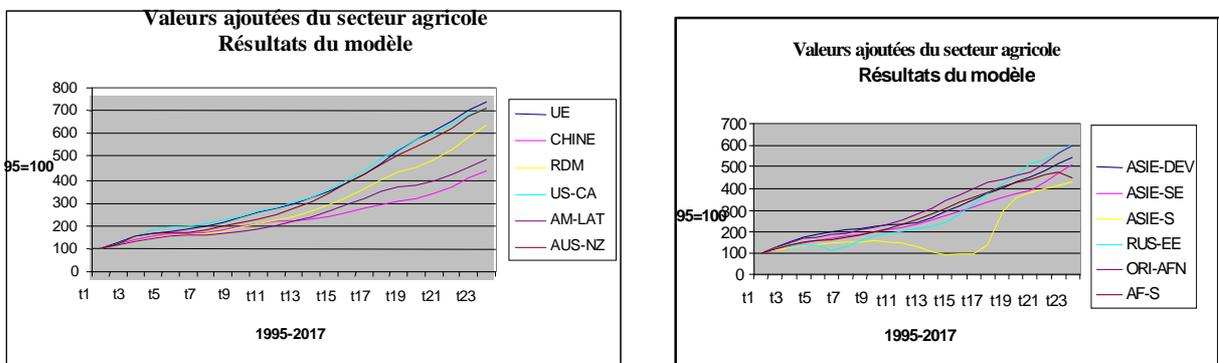


Figure 4 : Valeurs ajoutées du secteur agricole, dans le modèle à 12 pays.

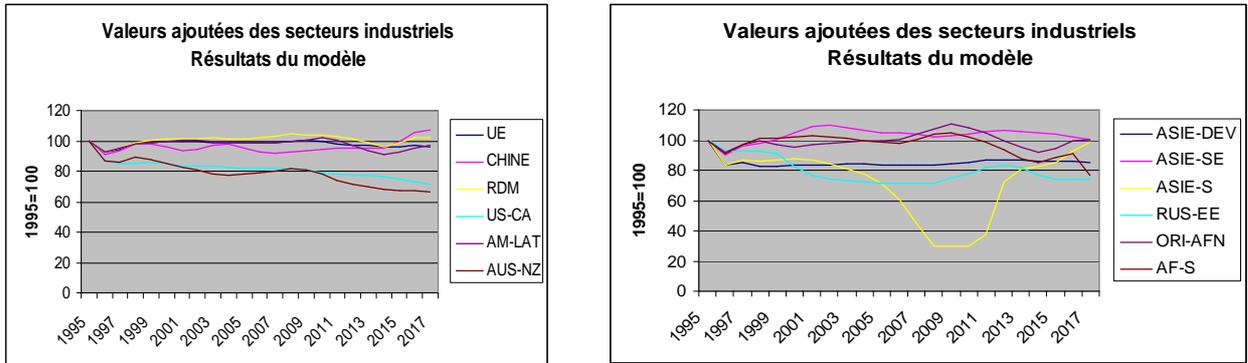


Figure 5 : Valeurs ajoutées des secteurs industriels dans le modèle à 12 pays.

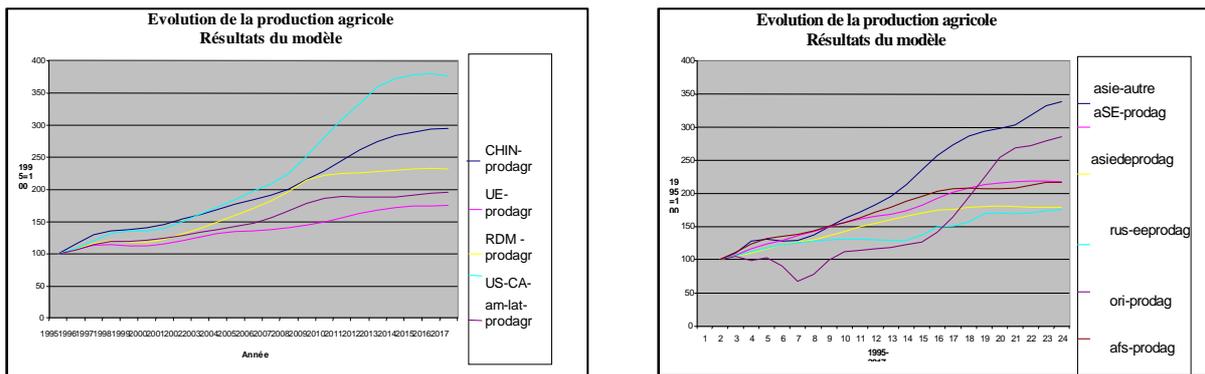


Figure 6 : Evolution de la production agricole dans le modèle à 12 pays.

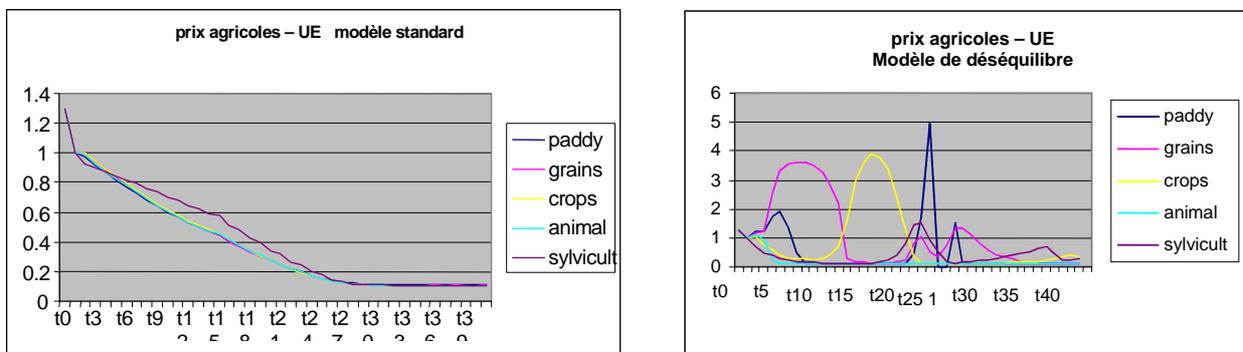


Figure 7 : Comparaison des prix agricoles, dans un modèle d'équilibre général standard, et dans le modèle récursif (modèle 3 pays) ;

Même si ces résultats restent encore à améliorer largement, ils sont encourageants et montrent que nous progressons peu à peu vers une représentation des dynamiques complexes de l'économie mondiale. Il faut bien comprendre qu'une telle approche, qui s'affranchit de la référence omniprésente à l'équilibre, pour tenter de représenter les déséquilibres nés des difficultés de l'ajustement automatique des marchés libres, est radicalement nouvelle.

On illustre ici cette différence entre l'approche « standard » et l'outil développé dans cette étude, basé sur la représentation des non linéarité à l'œuvre dans les systèmes économiques, génératrices d'une dynamique complexe des prix comme des quantités. On s'affranchit de la référence omniprésente à l'équilibre pour l'étude des déséquilibres générées par les difficultés de l'ajustement entre offre et demande. La figure 7 permet de comparer l'allure des résultats obtenus dans une « version standard » du modèle et le même résultats en tenant compte des déséquilibres représentés dans notre outil.

D.2 Quelques exemples de résultats

Bien que nous ne soyons pas satisfait des résultats de notre scénario de référence, nous avons réalisé quelques simulations afin de montrer un échantillon du type de résultat liés à la mise en oeuvre du Protocole de Kyoto. On compare ici trois scénarii :

- un scénario de référence dans lequel il n'y a aucun engagement de réduction des émissions (REF)
- un scénario dans lequel l'Europe et les Etats Unis s'engagent à réduire leurs émissions à raison de 2,5 % par an par rapport a la première année de référence (valeur choisie à titre illustratif) (Scénario 1)
- un scénario dans lequel seule l'Europe s'engage à faire de telle réduction. (Scénario 2)

Il n'y a pas de marché international des droits entre pays dans cette version.

Comme le montre la figure suivante, les conséquences des différents scénarios sur les revenus sont contrastées au cours du temps non seulement entre les régions mais aussi entre les ménages riches et les ménages pauvres de chaque région.

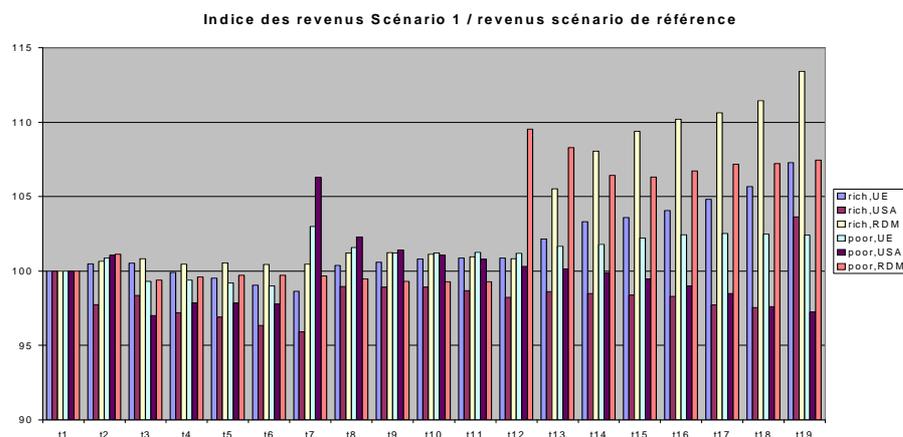


Figure 8 : Qui gagne, qui perd, et quand, quand on limite les émissions de gaz à effet de serre.

(les barres représentent le rapport : revenus sans limitation/revenu avec limitation dans le modèle à 3 pays).

Sur l'ensemble des périodes, les ménages riches des pays qui n'ont pas d'engagement de réduction (RDM) ont tendance à augmenter alors que l'évolution des revenus des ménages pauvres est bien plus contrasté entre les différentes périodes et moins favorables.

Ce sont les Etats – Unis qui subissent les pertes les plus importantes de revenus lors de la mise en œuvre des engagements de réduction, aussi bien pour les ménages riches que les ménages pauvres ; pour la plupart des périodes les ménages riches connaissent une baisse de revenus un peu plus importante que les ménages pauvres. Cette évolution défavorable est essentiellement liée à « l'effondrement » de la valeur ajoutée dans le secteur énergétique et à la baisse importante de celle-ci dans les services.

En Europe, une première période est marquée par une légère baisse des revenus des ménages riches et pauvres, tendance qui s'inverse au bout d'une petite dizaine d'année avec une évolution plus favorable cette fois-ci pour les ménages riches.

Lorsque seul l'Europe s'engage à réduire ses émissions, les conséquences sur les revenus sont beaucoup moins contrastées. La comparaison entre les deux scénarios illustrent bien les intérêts des différents groupes au cours des négociations sur le climat.

Les conséquences des différents scénarios sur les émissions sont illustrées par la figure ci dessous, on constate que les engagements envisagés permettent bien de réduire les émissions globales de Gaz à effets de serre de manière significative, malgré une légère croissance des émissions dans les pays sans engagements. De plus dans ce scénario, le non engagement des Etats Unis ne conduit pas à augmenter les émissions globales par les *leakages*

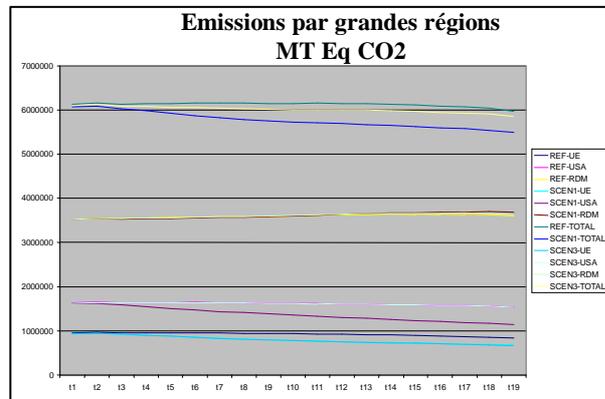


Figure 9 : Evolution des émissions dans trois scénarii
Il importe de noter la relative stabilité des émissions, par rapport à la volatilité des prix et des autres quantités.

L'évolution du prix des droits à émettre dans le scénario 1 (graphique ci dessous) fournit d'autres éléments pour l'analyse. D'une part, ce graphique illustre de nouveau, comme le graphique 1, que les engagements de réductions sont plus coûteux aux Etats Unis par rapport à l'Europe. En outre, après une croissance importante du prix des droits à émettre, la tendance s'inverse vers la treizième année, traduisant une tendance continue de diminution des activités fortement émettrices comme le secteur énergétique.

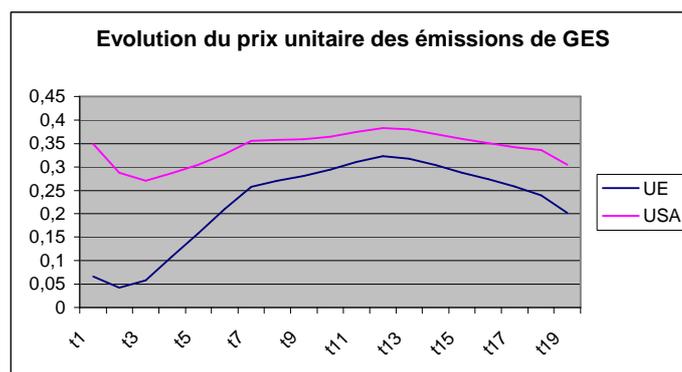


Figure 10 : Evolution du prix unitaire des émissions
Il importe de noter, ici encore, la remarquable stabilité de coût, par rapport à la volatilité des autres prix.

Chapitre VII - Conclusion

Nous avons par conséquent réussi à réaliser l'essentiel de ce que nous nous proposons de faire en lançant ce travail : obtenir un modèle relativement détaillé de l'économie mondiale, permettant ultérieurement la simulation des effets d'un grand nombre de politiques économiques, spécialement celles qui sont envisagées à l'échelon mondial pour éviter les émissions de gaz à effet de serre.

Ce modèle reprend la plupart des caractéristiques des modèles antérieurs, et, en particulier, de GTAP, dont il utilise les données. Il n'a pas un niveau de désagrégation géographique considérable, mais c'est inévitable, justement à cause des données utilisées. De toute façon, à notre connaissance, il n'existe pas de moyen de faire mieux sur ce point.

Il se distingue cependant de GTAP d'une façon assez fondamentale :

1°) Plutôt que d'être un modèle « d'équilibre général », c'est un modèle de « déséquilibre », qui prend en compte les erreurs d'anticipation, le risque, et le marché des capitaux. De ce point de vue, il représente une avancée importante de ce type de modèle, car on observe dans la littérature « grise » autour de GTAP de timides tentatives pour aller dans ce sens (en particulier, Ianchovichina et al, 1999), sans qu'elles soient aussi complètes que celles que nous présentons ici.

2°) C'est donc un modèle qui tient compte de la dynamique – ce qui n'est pas le cas des modèles utilisés jusqu'ici en matière d'effet de serre.

3°) Il tient compte aussi de la répartition des revenus, avec une distinction entre « riches » et « pauvres » à l'intérieur de chaque « région ». Quoique cette distinction soit encore fort rustique, elle a le mérite d'exister. Elle est importante, parce que les discussions sur le protocole de Kyoto ne peuvent en aucun cas évacuer ce problème de la répartition des revenus, et aussi parce que, dans les négociations internationales, la France a intérêt à se faire le « champion des défavorisés ». Elle a exigé la réalisation d'un corpus spécial de données, issues d'une désagrégation des données de l'unique « ménage » de GTAP.

4°) Ce modèle est « testable », contrairement à la plupart de ceux qui ont été proposés jusqu'ici dans le domaine. Non qu'il soit possible de pratiquer des tests statistiques de la qualité des estimations, comme on le fait dans le cas des modèles dont les coefficients sont déterminés par des procédures faisant appel à l'inférence statistique (même si l'interprétation de ces derniers tests est beaucoup plus délicate qu'on ne le croit généralement). Mais, du fait qu'il est tout de même possible de comparer les résultats du modèle à des chiffres réels, et de regarder si au moins, « l'allure » des chroniques ainsi obtenues est la même que celle des séries observées historiquement, le travail présenté ici représente une avancée réelle dans la technologie de la fabrication de cette sorte d'instruments, jusqu'ici validés uniquement par leur cohérence interne.

En outre ce travail aura eu un certain nombre d'effets secondaires qui n'étaient pas prévus au départ. En particulier, la préparation de données sur les émissions et sur d'autres facteurs limitant de la croissance économique (comme les disponibilités en eau) a permis de soulever quelques questions méthodologiques d'importance. Il serait tout spécialement utile de s'imprégner de la notion de « pollution ajouté » dans les discussions sur l'effet de serre.

Quoique l'idée soit banale, elle est loin d'être banalisée dans les esprits, et cela obscurcit beaucoup de discussions sur cette question.

Cela dit, il reste beaucoup à faire, et, sur de nombreux points, nous n'avons pas été aussi loin que nous l'aurions désiré :

1°) Le modèle n'est pas « clefs en main », avec une notice d'utilisation, et une interface permettant à presque n'importe qui de s'en servir. La raison en est, un peu, que nous n'avons pas les ressources en programmation pour le faire, mais, surtout, que nous ne sommes pas encore assez satisfaits des résultats des tests pour envisager cette dernière étape du travail.

2°) Nous avons encore de très gros problèmes de convergence des algorithmes, et de temps de calcul. La « grosse » version du modèle exige plusieurs heures de calculs sur un micro ordinateur, et cela ne facilite pas l'exploration de nombreuses variantes.

3°) Nous n'avons en conséquence pas eu le temps de préparer des scénarios biens « propres » « avec » et « sans » différentes variantes de politiques ; nous nous sommes contentés d'un scénario de référence, dont nous ne sommes encore qu'à moitié satisfaits.

4°) Nous n'avons pas eu le temps d'incorporer nos réflexions sur l'eau dans notre modèle, bien qu'il s'agisse là, en fait, presque d'une formalité.

Pour ces raisons, le modèle que nous proposons ici n'est pas encore un « produit fini ». C'est plutôt l'amorce de nombreuses pistes de recherche qui devront être explorées dans l'avenir. En particulier, il faudra :

1°) Rechercher les moyens d'accroître la vitesse d'exécution des calculs.

2°) Envisager des alternatives techniques dans la formulation des fonctions de consommation dans le modèle.

3°) Améliorer la description de la dynamique des investissements et des choix financiers (en particulier, pour tenir compte de l'instabilité des taux de change).

4°) (et surtout) : utiliser le modèle dans de vrais scénarios alternatifs en matière de lutte contre l'effet de serre.

Références

- Boussard, J.M. (1996) : *When risk generates chaos*, Journal of Economic Behaviour and Organisation **29** :433 :446.
- Boussard, J.M., et A.K. Christensen (1997) *Modèles Calculables d'Equilibre général, Risque et Place de l'Agriculture dans l'Economie Nationale : Application à la Pologne et à la Hongrie*.Economie Rurale, (6:).
- Boussard, J.-M. (1998) : *L'agriculture et la prochaine négociation de l'OMC*. Revue Politique et Parlementaire 100 (992) :127-137.
- Burniaux, J.-M. (2000), *Efficacité et équité dans le contrôle à long terme de l'effet de serre*, Economie Internationale 82, 2eme trimestre : 137-166.
- Burniaux, J.M. (2000) : *A multi gas assessment of the Kyoto Protocol*. Economics department working paper n°270.
- Chavas, J.P. et M.T. Holt (1993) : *Market instability and non linear dynamics*, AJAE **75** : 113-120.
- Day, R.H. (1994), *Complex economic dynamics*, vol I, The MIT Press, Cambridge, Massachussets.
- Day, R.H. (1999), *Complex economic dynamics*, vol II, The MIT Press, Cambridge, Massachussets.
- Grandmont, J.M. (1982) : *Temporary general equilibrium in*: Arrow, K.J. and Intriligator M.D, ed. : *Handbook of mathematical economics* Vol II, North Holland, Amsterdam : 921-922.
- Hertel, T. et al. (1997) : *Global Trade Analysis*, Cambridge University press, Cambridge.
- Manne, A.S., R.G. Richel (1998) : *The Kyoto Protocol : a cost effective strategy for meeting environmental objective ?* Paper presented to the Economic Modeling of Climate Change Workshop : background analysis for the Kyoto Protocol, OECD, 17-18 September 1998.
- Markowitz (1970) : *Portfolio analysis : Efficient diversification of investments*, Yale university press, Yale.
- Pratt, J.W. (1964) : Risk aversion in the small and in the large. *Econometrica* 32 (1-2) : 122-136.
- Van der Mendbrugghe, D. (1998) : *A preliminary analysis of the Kyoto Protocol : using OECD GREEN model*, Paper presented to the Economic Modeling of Climate Change Workshop : background analysis for the Kyoto Protocol, OECD, 17-18 September 1998, 23 p.

F) Valorisation de l'étude

Cette étude est encore trop récente pour avoir été valorisée à grande échelle. Elle a cependant fait l'objet d'une présentation à la 5^{ème} conférence on Global Economic Analysis, organisée par le Center for sustainable development de l'Université de Taïpei, et le consortium GTAP. Agricultural trade liberalisation in a world of uncertainty discussion of the the results of a world GGE model, par Boussard, et al. (session 5 A 13, volume II des proceedings).

Nous avons pu à cette occasion vérifier que nous avons bien acquis le « ticket d'entrée » évoqué plus haut dans le cercle fermé des modélisateurs de haut niveau.

G) Disponibilité des données et perspectives d'avenir

Le modèle développé au CIRAD dans le cadre de l'appel d'offre GICC1 est un modèle dynamique multi-sectoriel mondial, avec un zoom sur l'agriculture composé de deux modules : un module " physique " représentant les économies considérés et leurs interactions par les marchés internationaux des biens et un module financier dans lequel est décidé chaque année l'allocation des capitaux entre les différents pays et les différents secteurs de production.

Ces originalités du modèle sont fondamentales pour traiter les questions qui nous intéressent, en particulier parce qu'elles peuvent modifier considérablement les allocations et les échanges par le marché tant des biens que des permis d'émissions. Ainsi, par exemple, l'idée sous-jacente derrière les échanges des permis d'émissions de GES est basée sur la notion que les marchés sont efficaces pour allouer à moindre coûts les efforts de réduction entre les différents pays en fonction de leurs avantages comparatifs, en permettant que les efforts de réduction soient plus importants dans les pays où les coûts d'abattement sont les plus faibles. Ce résultat dépend cependant fondamentalement du fait que les équilibres sont simultanés et les prix connus avec certitude. La prise en compte de l'incertitude sur les prix futurs, des erreurs d'anticipation qui y sont associées, de l'irréversibilité du temps et de la réaction des acteurs face au risque peut modifier considérablement ce résultat (Boussard 1996).

Par ailleurs, contrairement à la plupart des modèles de ce type et s'intéressant à la question de l'effet de serre, le modèle du CIRAD a volontairement retenu une désagrégation fine du secteur agricole, parce que cette activité se trouve au cœur tant de la génération que de la résorption des gaz à effets de serre (l'agriculture, par ses pratiques "modernes" est souvent un émetteur de dioxyde de carbone et de méthane, mais c'est aussi, par la reforestation, et le possibilité de remplacer les carburants fossiles par des carburants "vert", une source potentiellement considérable de réduction des émissions, cf. Académie d'Agriculture 2000). Chaque économie est ainsi composé de dix secteurs dont cinq concernent directement le secteur agricole : le riz, les produits animaux, la sylviculture, les autres céréales, les autres productions agricoles. Cette désagrégation permet de raffiner la prise en compte des émissions et de la séquestration des gaz à effet de serre d'origine agricole, chacune de ces activités pouvant être divisée en techniques " sales " ou " propres " au regard des émissions de GES.

Il y a cependant encore du travail à faire sur ce modèle :

Le module " capital "

L'amélioration de ce module, qui vise à représenter de façon endogène la détermination des taux d'intérêt et des taux de change, est un élément majeur de notre proposition de recherche. On supposera, à la fin de chaque période, que chaque agent représentatif cherche à allouer son épargne afin de maximiser sa richesse future. Pour cela, il choisit d'allouer son épargne entre les différents secteurs de l'économie (en fonction du niveau de rentabilité espérée et du risque associé), l'achat de titre de la dette des autres pays (en fonction de la différence entre les taux d'intérêt de son pays et des autres nations, des taux de change et du risque associé) ou de la garder sous forme de liquidité. On espère ainsi

développer un modèle de gestion patrimoniale des actifs financiers, une approche incontournable compte tenu de la nature des problèmes posés.

On utilisera pour cela une maximisation de l'utilité de Von Neumann de chaque décideur. L'utilité de Von Neumann pose de réels problèmes de calcul numérique, dans la mesure où, pour calculer l'espérance mathématique associée, il faut faire des hypothèses sur les lois de probabilité des événements que l'on prend en considération, essentiellement, ici, les variations de prix. Or on connaît bien peu de choses sur les lois de probabilité des prix.

Pratiquement, on aura deux solutions qui seront essayées toutes deux : Soit utiliser les travaux de Markovitz (1970) et de Pratt (1964) pour obtenir approximation de l'utilité de Von Neumann au voisinage de l'équilibre à partir de la variance des prix, soit partir de l'hypothèse simplificatrice d'une loi de probabilité intégrable pour les prix – en l'occurrence, une loi uniforme – et calculer directement l'utilité de Von Neumann.

La demande de monnaie, issue de ce processus, et son offre (variable exogène, déterminée par la politique monétaire nationale) déterminent alors le taux d'intérêt national. De la même façon, l'offre et la demande de chaque monnaie déterminent des taux de change.

Les principales équations sont fournies en annexe, et le modèle est virtuellement prêt. Au contraire de celui qui concerne la partie "principale" du modèle (les équilibres physiques), le programme informatique correspondant à ce "module financier" n'a cependant encore jamais été complètement écrit et validé, ce qui motive l'inclusion de ce volet méthodologique dans la proposition.

Prendre en compte les marchés à terme

La représentation des échanges internationaux est actuellement réalisée dans le modèle à partir de l'hypothèse dite "Armington" de substituabilité imparfaite entre les produits obtenus localement dans un pays ou une région donnée, et les produits étrangers". En même temps, cette hypothèse permet d'évacuer ce qui est peut être l'un des plus importants problèmes du commerce international des matières premières – et donc de l'énergie - : les incertitudes et les risques auxquels sont confrontés les opérateurs sur ces marchés. Nous chercherons à formaliser une représentation plus réaliste de leur fonctionnement, en représentant le comportement des négociants et en considérant le recours possible au marché à terme sur lesquels

- i) le prix d'une transaction physique peut-être déterminé plusieurs mois à l'avance (vente ou achat à terme) et :
- ii) un prix d'assurance minimum (put) ou maximum (call) peut être négocié par l'échange d'options.

Etant donné que le recours à ce type de marché est souvent considéré par les économistes libéraux comme la solution à tous les problèmes de risque auxquels sont confrontés les producteurs et les transporteurs de matières premières, il nous paraît utile d'examiner la possibilité d'introduire ces instruments dans notre modélisation, pour en préciser le rôle. L'approche patrimoniale évoquée plus haut se prête particulièrement bien à une telle innovation dans les techniques de modélisation.

Une fois ce travail effectué, le modèle pourra être utilisé pour porter un regard neuf sur un certain nombre de questions pendantes :

Scénarii et analyses à réaliser

Les scénarii pour lesquels nous envisageons des simulations à l’horizon 2030 et leur formalisation dans le modèle sont les suivants :

◆ Répartition initiale des droits à polluer et flux de capitaux: quotas d’émission, puits

On envisagera plusieurs modes d’attribution des quotas :

- i- par tête, en fonction du niveau d’émission pris comme référence à Kyoto (1990),
- ii- aux enchères, les sommes recueillies servant à abonder au fond d’aide au développement (deux variantes ici : soit “ vente en une seule fois ”, soit “ location de droits ” renouvelée chaque année.
- iii- prise en compte ou non des puits ;
- iv- participation des pays en voie de développement à l’effort de réduction à différentes échéances.

Les permis d’émission pourront être considérés comme un facteur de production supplémentaire. On utilisera pour les niveaux d’émissions les mêmes hypothèses que celles retenues dans le modèle GREEN pour les secteurs non agricoles. Il importe de noter que les secteurs agricoles auront le choix entre différentes techniques avec différents niveaux de coût et d’émission (les données seront issues du projet GECS). Il s’agit là d’une originalité notable dans les modèles d’équilibre général, dans lesquels, habituellement, parce que toutes les relations sont exprimées sous forme d’égalité, il n’est en général possible d’envisager qu’une seule technique de production par produit. Notre modèle, faisant un large usage de la méthode connue sous le nom de “ slack complementarity ”, n’est pas soumis aux mêmes restrictions.

Par ailleurs, et dans le même esprit, les mécanismes de développement propres pourront être représentés sous la forme de dépenses en capital associées à un choix de technique de production permettant de réduire les émissions. On pourra donc :

- a) tester les impacts de différents niveaux de capital alloué.
- b) décrire les flux de capitaux internationaux associés aux différents scénarios (en particulier, différencier une attribution des quotas “ en une seule fois ” et “ en location ”).

Bien évidemment, chaque scénario donnera lieu à plusieurs variantes rendant compte des divergences d’estimations existantes pour les principales variables exogènes :

- la transition démographique dans les différents pays ;
- la mise au point de nouvelles technologies propres ;
- l’impact du changement climatique sur les rendements agricoles.

On aura ainsi la possibilité de comparer les résultats en fonction des hypothèses réalisées sur le fonctionnement des marchés.

◆ Non ratification du Protocole par les USA

On envisagera le cas où le protocole est uniquement signé par les pays de l'annexe 1 et celui où il inclut les pays en voie de développement. L'impact sur la rentabilité des activités, lorsque la réduction des émissions ne se fait pas par des technologies à double dividende, devrait alors bénéficier aux producteurs américains. On comparera en particulier les parts de marché dans ce scénario avec celles obtenues lorsque les américains ratifient le Protocole.

Chacun de scénarios précédents fera donc l'objet de quatre sous scénarios, " avec " et " sans " ratification des Américains, " avec " et " sans " inclusion des PVD.

- niveau d'émission ;
- croissance économique dans chaque région du monde et différenciée par secteurs ;
- impact sur la distribution des revenus dans chaque nation et entre nations, ce qui permettra une analyse en terme d'équité ;
- niveau et instabilité des prix internationaux ;
- impact sur la sécurité alimentaire en considérant à la fois le niveau de production en denrées agricoles de chaque région et sa capacité financière à se les procurer en cas de déficit.
- Impact sur la répartition des revenus (ce qui est possible du fait que notre modèle distingue les " ménages pauvres " et les " ménages riches " dans chacune des régions étudiées).

H) Résultat à valoriser sur le site GICC

Les résultats obtenus jusqu'ici avec ce modèle sont encore trop préliminaires pour être publiés tels quels sur le site GICC. Il n'est pas sûr, après tout, que les Américains riches soient les principaux perdants en cas d'implémentation d'un mécanisme de réduction des émissions, même si, ce résultat ne fait que confirmer ceux d'autres études, et explique au fond l'attitude américaine vis-à-vis du Protocole de Kyoto. Il ne faut pas jouer avec le feu, et publier sur le web des résultats susceptibles de révision avec d'autres versions du modèle. Il faudra donc, pour en publier les résultats dans ces conditions, attendre que de très nombreux essais de notre modèle, effectués dans une grande variété de situations différentes, permettent de vérifier la robustesse de ces observations préliminaires, mais prometteuses.

Ce qui est par contre complètement sûr et solide, ce sont les résultats qualitatifs obtenus avec le micro-modèle, qui ne fait lui-même que confirmer les analyses faites avec des modèles encore plus simples.

Ce micro-modèle est théorique, et utilise des données fantaisistes. Mais il montre toute l'ampleur de la différence entre les résultats d'un modèle standard, comme ceux qui sont actuellement largement utilisés pour l'étude des conséquences de l'instauration des droits de polluer, et ceux d'un modèle physico-financier comme celui que nous proposons, et qui tient compte de l'imperfection des marchés financiers et des erreurs d'anticipation.

Ce modèle est simple. Il tient en quelques équations, et donne lieu à un code GAMS de quelques pages seulement. Il est concevable de l'installer en démonstration sur un sous site web dédié. On pourrait même le réécrire sous forme de fichier Excel, et le diffuser à la demande. Il a été fait dans cet esprit. Il relativise les bénéfices à attendre des mécanismes de marché pour la répartition des permis d'émission. C'est donc une pièce importante à verser au dossier. Si le GICC le souhaite, une proposition détaillée pour un site web de ce genre est susceptible d'être faite.