



## DOCUMENTS DE TRAVAIL DE LA DG TRÉSOR

Numéro 2010/05 – Octobre 2010

---

# **L'évaluation des coûts macroéconomiques des politiques de réduction des émissions de gaz à effets de serre**

---

Pascale SCAPECCHI

---



# L'ÉVALUATION DES COUTS MACROÉCONOMIQUES DES POLITIQUES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Pascale SCAPECCHI<sup>1\*</sup>

Ce document de travail n'engage que ses auteurs. L'objet de sa diffusion est de stimuler le débat et d'appeler commentaires et critiques.

**\*Pascale SCAPECCHI** est Chargée de mission à la Direction Générale du Trésor du Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (France)

[pascale.scapecchi@dgtresor.gouv.fr](mailto:pascale.scapecchi@dgtresor.gouv.fr) : +33-44-87-14-29

---

1 Économiste au bureau Environnement et Agriculture.

# TABLE DES MATIERES

|                                                                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RÉSUMÉ .....</b>                                                                                                                                   | <b>3</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                                                                 | <b>3</b>  |
| <b>1. Le climat, un bien économique particulier .....</b>                                                                                             | <b>6</b>  |
| <b>2. Approches standards de modélisation économique.....</b>                                                                                         | <b>7</b>  |
| 2.1 Modèles technico-économiques .....                                                                                                                | 7         |
| 2.2 - Modèles macroéconomiques.....                                                                                                                   | 8         |
| 2.3 - Limites des approches <i>bottom up</i> et <i>top down</i> .....                                                                                 | 10        |
| 2.4 - Les modèles hybrides.....                                                                                                                       | 11        |
| <b>3. Prise en compte des caractéristiques spécifiques du changement climatique lors de l'évaluation de l'impact de la politique climatique .....</b> | <b>12</b> |
| 3.1 - Les possibilités de substitution technologiques.....                                                                                            | 13        |
| 3.2 - La modélisation du progrès technique.....                                                                                                       | 14        |
| 3.3 - La trajectoire du modèle .....                                                                                                                  | 15        |
| 3.4 - Les échanges de permis d'émission et flux de capitaux .....                                                                                     | 15        |
| 3.5 - Autres variables pouvant influencer sur le coût d'une politique climatique.....                                                                 | 16        |
| <b>4. Exemples d'application de ces modèles à l'évaluation de politiques climatiques .</b>                                                            | <b>18</b> |
| 4.1 - Estimation de la valeur du carbone sur les secteurs hors ETS.....                                                                               | 18        |
| 4.2 - Évaluation de l'impact macroéconomique de la hausse des prix des énergies au Royaume-Uni.....                                                   | 20        |
| 4.3 - Evaluation de mécanismes sectoriels pour les pays en développement.....                                                                         | 21        |
| 4.4 - Comparaison de trois modèles évaluant l'objectif 20-20-20 de l'UE.....                                                                          | 22        |
| 4.5 - Leçons à tirer de ces applications .....                                                                                                        | 23        |
| <b>5. Conclusions sur le choix du modèle pour estimer les coûts d'une politique climatique.....</b>                                                   | <b>24</b> |

## RÉSUMÉ

Afin de lutter contre le défi mondial que constitue le changement climatique, de nombreuses politiques nationales ou supra-nationales de réduction des émissions de gaz à effet de serre ou d'adaptation aux impacts du changement climatique ont été ou sont mises en place. Les décideurs ont dès lors besoin d'analyses d'impact de ces politiques, notamment en termes de coûts et de bénéfices macroéconomiques. La modélisation économique est, en cela, très utile, mais diverses approches coexistent et apportent des résultats très divergents. Ce document examine les différentes approches disponibles dans la littérature actuelle en confrontant les avantages et les inconvénients de chacune au regard des questions posées en termes de coûts des politiques climatiques.

## ABSTRACT

In order to fight against this global challenge that climate change is, many national or subnational policies aiming at reducing greenhouse gases or adapting to climate change impacts have been or are being implemented. Policy makers then request impact assessment of these policies, especially in terms of macroeconomic costs and benefits. Economic modeling is, in this respect, very useful, but different approaches co-exist and lead to divergent results. This report analyses the different approaches currently available in the existing literature by assessing the pros and cons of each of them with respect to questions related to climate policy costs.

# SYNTHESE

La prise de conscience associée au réchauffement planétaire ainsi qu'à ses impacts économiques a incité à la mise en place de politiques nationales ou supra-nationales pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les décideurs se sont alors intéressés à une meilleure compréhension de l'efficacité et des coûts macroéconomiques de ces politiques dites climatiques dont l'objectif est de réduire les émissions de GES et d'inciter les acteurs économiques à passer à une économie sobre en carbone.

La modélisation économique peut permettre d'évaluer l'impact de la mise en place d'une politique publique sur l'ensemble de l'économie et constitue dès lors un outil précieux d'aide à la décision en général, et dans ce domaine de l'analyse économique appliquée plus particulièrement.

Sur les problématiques climatiques, deux grandes familles d'approches sont utilisées : l'approche *bottom up* (modèles technico-économiques) et l'approche *top down* (modèles économiques). Compte tenu des limites de chacune d'entre elles, une approche dite hybride a été développée ces dernières années.

Ces approches diffèrent principalement en raison des hypothèses technologiques et économiques sous-jacentes. Elles présentent également des disparités en termes de description de l'équilibre (partiel ou général). Ces différences structurelles expliquent en partie pourquoi l'évaluation du coût d'une politique peut considérablement varier en fonction de l'approche utilisée pour sa modélisation.

L'influence du choix du modèle étant déterminante, il est préférable de bien comprendre les possibilités et limites de chacun d'eux avant de pouvoir identifier celui qui sera le plus à même de répondre à l'objet fixé, à savoir l'évaluation d'une politique climatique. Certaines spécifications peuvent affecter les résultats de manière significative et méritent donc une attention particulière.

Ce document propose de comparer les différents modèles économiques utilisés actuellement pour évaluer l'impact sur l'activité économique d'une politique climatique donnée. Des exemples d'application de ces modèles à l'évaluation des politiques climatiques sont également présentés. Une attention particulière est portée aux variables qui peuvent significativement influencer sur les coûts d'une politique climatique, et plus précisément comment ces variables sont modélisées, afin de fournir des recommandations pour l'évaluation des impacts macroéconomiques des politiques climatiques.

# Introduction

La prise de conscience du réchauffement planétaire et de ses impacts économiques et sociaux a conduit à la mise en place de politiques nationales ou supra-nationales pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les décideurs se sont alors notamment intéressés à une meilleure compréhension de l'efficacité et des coûts macroéconomiques de ces politiques dites climatiques dont l'objectif est de réduire les émissions de GES et d'inciter les acteurs économiques à passer à une économie sobre en carbone.

La modélisation économique peut permettre de déterminer l'impact de la mise en place d'une politique publique sur l'ensemble de l'économie. Elle constitue dès lors un outil précieux d'aide à la décision en général, et dans ce domaine de l'économie plus particulièrement. On distingue communément deux grandes approches qui peuvent être employées dans ce but : l'approche *bottom up* (modèles technico-économiques) et l'approche *top down* (modèles économiques). Au vu des limites de chacune d'entre elles, une approche dite hybride a été développée ces dernières années.

Ces approches diffèrent principalement en termes d'hypothèses technologiques et économiques sous-jacentes. Elles présentent également des disparités en termes de description de l'équilibre (partiel ou général). Ces différences structurelles expliquent en partie pourquoi l'évaluation du coût d'une politique peut considérablement varier en fonction de l'approche utilisée pour sa modélisation.

L'influence du choix du modèle étant déterminante, il est préférable de bien comprendre les possibilités et limites de chacun d'eux avant de pouvoir identifier celui qui sera le plus à même de répondre à l'objet fixé, à savoir l'évaluation d'une politique climatique. Certaines hypothèses peuvent affecter les résultats de manière significative et méritent donc une attention particulière.

Ce document propose de comparer les différents modèles économiques utilisés actuellement pour évaluer l'impact sur l'activité économique d'une politique climatique donnée, impact généralement exprimé en termes de perte de PIB. Les politiques climatiques considérées concernent uniquement des politiques d'atténuation des rejets de GES dans l'atmosphère : il ne s'agit pas de considérer ici une approche purement fiscale de taxation des externalités négatives environnementales. Cette analyse permettra d'aider à identifier l'approche la plus pertinente compte tenu des caractéristiques propres au changement climatique.

Après avoir brièvement rappelé le contexte particulier relatif au changement climatique, ce document présentera les deux grandes catégories de modèles dont on dispose pour évaluer les coûts d'une politique publique : les modèles technico-économiques et les modèles macroéconomiques. La troisième partie portera spécifiquement sur les modèles hybrides, vision multidisciplinaire de la problématique environnementale, combinant les aspects scientifiques et socio-économiques des changements climatiques dans un même cadre analytique afin d'explorer les interactions entre les activités humaines et l'atmosphère. Les variables qui peuvent significativement influencer sur les coûts d'une politique climatique seront ensuite analysées, en portant une attention particulière sur leur modélisation. Une cinquième partie présente des exemples d'application de ces modèles à l'évaluation de politiques climatiques. La sixième partie conclut ce document et fournit quelques recommandations pour l'évaluation des impacts macroéconomiques des politiques climatiques.

# 1. Le climat, un bien économique particulier

Le climat est un bien économique possédant des caractéristiques particulières qui font de lui un bien public. D'une part, c'est un bien non rival, ce qui signifie qu'il est possible de le consommer plusieurs fois sans le modifier et que plusieurs agents peuvent le consommer simultanément sans que la consommation de chacun d'eux ne soit altérée. D'autre part, c'est un bien non exclusif, ce qui signifie qu'il est impossible d'empêcher un agent de le consommer. Comme tout bien public, il est associé à des externalités négatives (de nombreuses activités économiques génèrent des émissions de GES) et à des problèmes de type « passager clandestin » : chaque pays a intérêt à ce que les autres pays diminuent leurs émissions et à ne rien faire lui-même, bénéficiant ainsi des réductions faites par les autres sans les avoir financées. En outre, plus les autres pays diminuent leurs émissions via les réductions de consommations de combustibles fossiles, moins ces produits sont chers (déplacement de l'équilibre offre-demande et baisse du prix du CO<sub>2</sub> liés à ces produits), et plus ce pays a intérêt à en consommer.

Une autre caractéristique du climat est qu'il est associé à de nombreuses incertitudes aussi bien sur les aspects scientifiques que sur les aspects économiques. Tout d'abord, nous ne savons pas avec exactitude de combien de degrés la température moyenne globale de la Terre va augmenter sur les 100 prochaines années, et les prévisions se fragilisent d'autant plus que l'horizon temporel s'éloigne. Deuxièmement, les impacts d'un certain accroissement de la température moyenne globale (à supposer qu'il soit parfaitement estimé) ne sont pas certains : selon certains climatologues, il y a une faible probabilité non nulle d'impact catastrophique. Des recherches récentes semblent notamment suggérer que la fonte des glaces est plus rapide que ce qui avait été anticipé sur certaines parties des pôles, mais nous ne savons pas exactement ce qui va se passer dans quelques décennies.

A côté de ces incertitudes scientifiques, il y a également des incertitudes économiques, principalement sur l'évaluation des coûts et des bénéfices des politiques climatiques visant à réduire les émissions de GES. En effet cette évaluation dépend de nombreux paramètres, comme par exemple les taux anticipés de croissance ou de la réactivité des agents économiques à la mise en place de ces politiques, qui sont très incertains de par leurs interactions avec le contexte économique. L'évaluation des coûts et des bénéfices des politiques climatiques repose également sur des hypothèses traduisant différentes considérations d'équité entre générations présente et future. Le choix du taux d'actualisation joue ici un rôle considérable, étant donné que certains impacts du changement climatique ne se réaliseront qu'à très long terme. De même, les coûts d'abattement des émissions, l'évolution des nouvelles technologies d'atténuation et les opportunités d'adaptation sont toutes autant incertaines. Toute évaluation des coûts d'une politique climatique doit donc prendre en compte ces différentes sources d'incertitude ainsi que l'aversion au risque des agents économiques.

Une des difficultés majeures liées au changement climatique est la possibilité d'effets de seuil et d'irréversibilité. Il apparaît que le réchauffement climatique n'est pas un processus lent et linéaire. Selon certains climatologues, certains phénomènes auront franchi des seuils de non-retour avant 2050 au-delà desquels un effet accélérateur se fera ressentir, avec pour conséquence, l'aggravation accrue du réchauffement. La fonte de la banquise arctique et son corollaire, la hausse du niveau des océans, les changements affectant la mousson d'été en Inde ou la disparition de la forêt amazonienne sont des exemples de phénomènes irréversibles. Il sera alors difficile de renverser ces effets, soit parce que cela sera trop coûteux, soit parce que cela sera physiquement et/ou techniquement impossible.

Le rapport Stern (2007) souligne l'importance d'agir vite en mettant en avant des bénéfices de l'action immédiate supérieurs aux coûts de l'inaction. Il indique qu'une baisse de 25 % des émissions de GES d'ici à 2050 ne devrait entraîner que de faibles perturbations pour l'économie mondiale, de l'ordre de 1 % du PIB mondial en 2050. Le coût total du changement climatique équivaldrait, au cours des deux prochains siècles, à une diminution moyenne d'au moins 5 % de la consommation par tête «aujourd'hui et pour toujours». Certains des choix méthodologiques qui sous-tendent l'analyse, notamment la séparation du calcul des dommages climatiques et des coûts de l'action ainsi que la faiblesse inhabituelle du taux d'actualisation (1,4 %), ont été vivement critiqués par des économistes comme W. Nordhaus<sup>2</sup> et R. Tol<sup>3</sup>. Mais, le message du rapport Stern reste économiquement fondé : le laissez-faire en matière climatique coûterait bien plus cher à l'humanité que les mesures de prévention requises pour maîtriser puis réduire les émissions de GES, à condition que celles-ci soient conçues de façon à en minimiser le coût économique.

L'analyse économique est clairement nécessaire pour estimer les coûts de politiques visant à réduire ou à limiter les impacts du changement climatique afin d'éclairer la prise de décision. Pour cela, des modèles ont été développés selon deux voies : l'approche technologique et l'approche économique.

## 2. Approches standards de modélisation économique

### 2.1 Modèles technico-économiques

Les modèles technico-économiques (*bottom up*) sont des modèles d'équilibre partiel qui formalisent les contraintes et opportunités technologiques afin d'identifier les comportements sectoriels portant principalement sur l'offre et la demande détaillées de certains facteurs de production, ceci dans le but d'estimer les coûts totaux et marginaux d'abattement<sup>4</sup>, les prix des facteurs et les possibilités de mesures sans regret<sup>5</sup>. Ils s'appuient pour cela sur une description technologique détaillée des filières de chaque industrie, des passerelles technologiques entre elles et des attributs des équipements (rendement, capacités, structures de coûts, impacts) et de la concurrence entre vecteurs au stade des besoins (Rapport Finon, 2003)<sup>6</sup>. Le cadre de ces modèles est généralement national, même si certains, à l'image de POLES, fournissent des analyses internationales.

Sachant qu'il existe différents modes de productions concurrentiels faisant appel à des technologies différentes, ces modèles permettent d'identifier les technologies les plus efficaces à partir des coûts de production, des prix des énergies, des taux de pénétration des technologies sur le marché, etc. L'approche s'inscrit clairement dans une perspective de coût-efficacité. Ces modèles sont en effet souvent employés pour identifier les combinaisons technologiques les moins coûteuses pour atteindre un certain niveau de demande finale. Ils ont ainsi permis d'identifier l'existence de possibilités d'investissement rentables et non-exploitées, qualifiées de potentiels de réduction à coût négatif.

---

<sup>2</sup> W. Nordhaus (2006), "The "Stern Review" on the Economics of Climate Change", décembre 2006.

<sup>3</sup> Richard S.J. Tol (2006): «The Stern review of the economics of climate change: a comment», 30 octobre 2006.

<sup>4</sup> Le coût marginal se définit comme l'augmentation de coût associée à la production d'une unité supplémentaire. Ici, il s'agit du coût associé à la réduction d'une unité supplémentaire de pollution.

<sup>5</sup> Les mesures sans regrets sont des mesures visant à réduire les émissions de GES dont les coûts nets (i.e. coûts moins bénéfices) sont négatifs.

<sup>6</sup> Finon, D. (2003), « Prospective énergétique et modélisation - Identification de pistes de progression méthodologique », Note au Conseil Scientifique de l'Institut Français de l'Énergie.

Parmi les modèles *bottom up*, on distingue les modèles de *simulation*, qui s'appuient sur une description du processus de décision et de fonctionnement des marchés et dont l'objectif est la recherche d'un niveau de satisfaction donné, des modèles d'*optimisation* qui s'appuient sur des comportements de maximisation des profits (ou de minimisation des coûts) et sur la programmation mathématique pour mobiliser les potentialités de gains d'efficacité technologique. Ces modèles utilisent des données sur les diverses technologies disponibles, précisant notamment les intrants nécessaires à leur production ainsi que leurs coûts respectifs. En agrégeant ces informations sur tous les secteurs et toutes les technologies, on peut calculer le *mix* optimal pour atteindre, par exemple, un niveau de demande énergétique donné.

Ces modèles dépendent cependant des hypothèses macroéconomiques de rythme et structure de la croissance qui leur sont généralement apportées par des modèles *top down*. Ils sont donc capables de simuler la formation de la demande sur la base d'hypothèses technologiques et de comportements pour un ensemble de contraintes fixées *ex ante*.

De nombreux modèles technologiques ont été appliqués au domaine de l'énergie. Par exemple, on pourra citer le modèle énergétique MARKAL (*MARKet ALlocation*) (Fishbone *et al.*, 1983)<sup>7</sup> dont l'objet est d'optimiser le système énergétique sur le moyen terme avec une description explicite des technologies mises en oeuvre. Il a été utilisé dans le cadre français pour orienter industriels et décideurs dans leurs choix de stratégie énergétique, à des échelles régionales, nationales et internationales. MESSAGE (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*) est un autre exemple de modèle technologique, de programmation linéaire des systèmes énergétiques (Messner, 1997)<sup>8</sup>. Il a été notamment appliqué pour illustrer les rôles prépondérants de la dynamique d'apprentissage et du choix du taux d'actualisation sur la détermination des trajectoires de développement technologique. Enfin, le modèle POLES (Kouvaritakis *et al.*, 2000)<sup>9</sup> est également un modèle *bottom up* fréquemment employé. Modèle mondial régionalisé de simulation du système énergétique en équilibre partiel, POLES a été utilisé pour réaliser, dans l'exercice World Energy Technology Outlook 2004-2005 de la Commission Européenne (WETO), une prospective sur la consommation mondiale d'énergie en 2050.

Ces modèles, en confrontant les potentialités technologiques, la contrainte environnementale et les objectifs de politique publique (minimisation des coûts ou autre) permettent donc de déterminer les courbes de coût marginal d'abattement d'un pays mais ne peuvent pas déterminer l'impact d'une politique climatique sur le PIB puisque, en l'absence de bouclage macroéconomique, il n'est pas possible de savoir quelle politique est la plus efficace au niveau de l'ensemble de l'économie. Il faut pour cela recourir aux modèles macroéconomiques.

## 2.2 - Modèles macroéconomiques

Les modèles macroéconomiques (*top down*) donnent une vision agrégée de l'économie en partant d'un équilibre macroéconomique qui est progressivement désagrégé. Deux types de modèles *top down* sont fréquemment utilisés :

- les modèles macroéconométriques : généralement de type néo-keynésiens, ils reposent sur des estimations économétriques des comportements des agents économiques, notamment leurs anticipations ;

---

<sup>7</sup> Fishbone, L.G., G. A. Giesen, H. A. Goldstein, and H. A. Hymen (1983). User's Guide to MARKAL (BNL/KFA version 2.0). BNL-46319, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

<sup>8</sup> Messner, S. (1997). "Endogenized Technological Learning in an Energy Systems Model", *Journal of Evolutionary Economics*, Vol. 7, pp. 291-313.

<sup>9</sup> Kouvaritakis, N., A. Soria, and S. Isoard (2000). "Endogenous Learning in World Post-Kyoto Scenarios: Application of the POLES Model under Adaptive Expectations", *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 14, No. 1-4, pp. 222-248.

- les modèles d'équilibre général calculable : fondés sur la théorie microéconomique de l'équilibre général, ils décrivent, pour chaque facteur de production et chaque produit, l'équilibre de l'offre et de la demande obtenu grâce au système de prix.

#### a) Les modèles macroéconométriques

Les modèles macroéconométriques mettent en œuvre une analyse de l'équilibre économique dans le cadre de la comptabilité nationale. Ces modèles sont basés sur des comportements historiques, et tiennent compte des imperfections des marchés. Ils reflètent correctement les coûts d'ajustement de court terme relatifs à des changements de politique publique, l'inflation ou le chômage. Ils sont généralement utilisés pour simuler des chocs économiques et/ou employés comme *inputs* des modèles d'équilibre général calculable (voir ci-dessous).

Des modèles macroéconométriques ont été appliqués au domaine des changements climatiques. On peut citer par exemple le GMM (*Global Macroeconometric Model*) développé par Oxford Economics Forecasting. Ce modèle a été notamment employé pour explorer l'impact d'une variation des prix de l'énergie sur l'économie britannique. Un autre exemple de modèle macroéconométrique est le modèle MESANGE (Modèle Économétrique de Simulation et d'Analyse Générale de l'Économie)<sup>10</sup>, élaboré par la Direction de la Prévision, puis DG Trésor, avec la collaboration de l'INSEE (Allard-Prigent *et al.*, 2002 ; Klein et Simon, 2010)<sup>11</sup> qui a été conçu essentiellement pour l'évaluation des politiques économiques. Il a été utilisé pour des exercices de bouclage macroéconomique des investissements liés à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

#### b) Les modèles d'équilibre général

Les modèles d'équilibre général reposent sur la théorie microéconomique du consommateur et du producteur. Ainsi, les consommateurs et les producteurs allouent leurs ressources de manière à maximiser respectivement leur bien-être (*utilité*) et profits. L'équilibre est atteint au travers d'ajustements dans les prix *relatifs*, qui sont déterminés par le modèle. En décrivant les liens entre les différents secteurs de l'économie, ces modèles reconnaissent non seulement les effets directs d'une politique donnée sur les entreprises et les ménages, mais également les effets indirects d'équilibre général. Ils peuvent donc reproduire une économie à l'équilibre sur la base d'ajustements par les prix et les quantités sur les facteurs de production. Ces modèles sont donc particulièrement adaptés pour l'évaluation du coût de politiques qui peuvent avoir à long terme des impacts macroéconomiques importants (e.g. adaptations sectorielles), comme par exemple une taxe carbone ou un marché des quotas d'émissions. Leur échelle est soit le cadre national, soit le cadre mondial.

On distingue les modèles d'*optimisation politique* (qui cherchent à déterminer les politiques optimales), et les modèles de *simulation politique* (qui évaluent des mesures politiques spécifiques). Les modèles d'optimisation sont plutôt normatifs, dans le sens où ils s'efforcent de déterminer la politique idéale, en adoptant une approche coût-bénéfice (les coûts marginaux d'abattement sont rapportés aux bénéfices marginaux futurs à ces réductions). Les modèles de simulation visent à évaluer l'impact d'une politique spécifique déterminée de manière exogène. Ils sont donc plutôt de type descriptif.

<sup>10</sup> Le modèle MESANGE est décrit de manière plus détaillée dans l'annexe 1.

<sup>11</sup> Céline ALLARD-PRIGENT, Cédric AUDENIS, Karine BERGER, Nicolas CARNOT, Sandrine DUCHENE, et Fabrice PESIN (2002), « Présentation du modèle MESANGE - Modèle Économétrique de Simulation et d'Analyse Générale de l'Économie », Document de travail du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Klein et Simon (2010) « Le modèle MESANGE, nouvelle version réestimée en base 2000 » *Les Cahiers de la DG Trésor*, n° 2010-02.

De nombreux modèles d'équilibre général calculable ont été développés afin de prendre en compte les relations complexes entre économie, énergie et environnement. On pourra citer par exemple le modèle GEM-E3 (*General Equilibrium Model for Energy-Economy-Environment interactions*) utilisé pour évaluer l'impact macroéconomique du paquet climat-énergie au niveau de l'UE<sup>12</sup>. Le modèle GEMINI-E3 (*General Equilibrium Model of International-National Interaction for Economy-Energy-Environment*) est un autre exemple de modèles d'équilibre général. Conjointement développé par le Ministère français de l'équipement et l'agence française d'énergie atomique, il a été utilisé par exemple pour évaluer l'impact économique du retrait américain du Protocole de Kyoto<sup>13</sup>.

La plupart des modèles d'équilibre général calculable sont statiques, c'est-à-dire qu'un équilibre à un moment  $t$  est comparé à un équilibre qui aurait émergé après la mise en place d'une politique donnée. Ces dernières années, des modèles d'équilibre général dynamiques ont été développés, comme le modèle EPPA (*Emissions Prediction and Policy Analysis*) du MIT (Babiker *et al.*, 2001)<sup>14</sup>, un modèle d'équilibre général multi-régional, récursif et dynamique, qui a été utilisé pour analyser les impacts des politiques de changement climatique.

### 2.3 - Limites des approches *bottom up* et *top down*

La principale limite des modèles *bottom up* est qu'ils n'intègrent pas une vision globale de l'activité économique, généralement considérée comme exogène, et ne permettent donc pas un bouclage macroéconomique. En conséquence, ils ignorent totalement les effets de retour associés à la mise en place de politiques publiques. De plus, certains de ces modèles ne prennent pas en compte l'incertitude ni les processus de diffusion des nouvelles technologies ; d'autres, comme MARKAL, prennent en compte l'incertitude et les nouvelles technologies dans le cadre de la programmation stochastique. Ils ne peuvent donc servir à l'évaluation exhaustive des impacts d'une politique donnée.

La modélisation des interactions entre la sphère économique et la sphère environnementale a été largement dominée par les modèles d'équilibre général. Leur intérêt fondamental est qu'ils sont pertinents précisément pour le long terme, notamment car ils peuvent intégrer des modifications des techniques de production (progrès technique) ; or un horizon de long terme correspond généralement bien aux échéances motivant les politiques environnementales. Pour leur part, les modèles macroéconométriques permettent de raisonner à court ou moyen terme, à structure de production donnée, et de préciser ainsi la trajectoire que parcourra une économie pour atteindre son équilibre de long terme.

Cependant, il faut noter que les modèles d'équilibre général reposent sur des hypothèses qui ne reflètent pas les déséquilibres observés (comme la flexibilité imparfaite du marché du travail ou la sous-utilisation des capacités de production), ni les ajustements transitionnels (qui sont évalués par les modèles macroéconométriques). Une critique souvent avancée à l'encontre des modèles d'équilibre général est qu'ils sont calibrés en considérant peu de moments statistiques, étant par conséquent moins à même de reproduire les fluctuations de court terme. En cela les modèles macroéconométriques apportent un complément nécessaire à l'évaluation des politiques environnementales.

---

<sup>12</sup> « Train de mesures pour la réalisation des objectifs fixés par l'Union européenne pour 2020 en matière de changement climatique et d'énergies renouvelables », Document de travail SEC(2008)85.

<sup>13</sup> Le modèle GEMINI-E3 est décrit de manière plus détaillée dans l'annexe 2.

<sup>14</sup> Babiker, M.H., J.M. Reilly, M. Mayer, R.S. Eckaus, I. Sue Wing and R.C. Hyman (2001). « The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Emissions, Sensitivities and Comparison of Results. Massachusetts Institute of Technology ». Joint Program on the Science and Policy of Global Change report #71.

En revanche, contrairement aux modèles *bottom up*, les modèles d'équilibre général et les modèles macroéconométriques proposent un degré de raffinement moindre des technologies qui sont appliquées puisqu'ils s'intéressent plutôt aux résultats économiques globaux. De fait, ces modèles manquent de flexibilité technologique et représentent mal le niveau des connaissances actuelles dans ce domaine.

Ces dix dernières années, des développements importants ont été apportés à ces différents modèles afin de surmonter ces limites. D'un côté, des modèles *bottom up* ont été modifiés afin d'intégrer des bouclages macroéconomiques ou d'estimer des paramètres de comportement microéconomique, relatif aux choix technologiques. D'un autre côté, des modèles *top down* ont incorporé le progrès technique de façon endogène, traduisant l'idée que la productivité des facteurs est liée, entre autres, aux politiques qui favorisent la recherche et le développement. Les modèles combinant les deux approches sont dits hybrides et font l'objet de la partie suivante.

## 2.4 - Les modèles hybrides

Les modèles hybrides combinant les caractéristiques des approches *top down* et *bottom up* ont été développés pour combler leurs lacunes respectives. Deux types d'approfondissement peuvent être envisagés : prolongement d'un modèle macroéconomique sectoriel par un module technologique ou prolongement d'un modèle technologique par un module macroéconomique. L'approche la plus courante est d'inclure un module *bottom up* dans l'un des modèles économiques présentés plus haut. Les modèles hybrides les plus courants correspondent à un modèle d'équilibre général où sont détaillés les aspects technologiques de sa fonction de production.

Les modèles hybrides distinguent les différentes technologies énergétiques et traitent explicitement les variations de prix relatifs entre ces différentes technologies. De par leur composante *top down*, ces modèles supposent des réponses rationnelles aux variations des prix relatifs.

Un avantage des modèles hybrides est que l'approche *bottom up* peut être utilisée pour déterminer les coûts directs d'une politique, alors que l'approche *top down* peut être employée pour évaluer les coûts indirects de cette même politique. En combinant les deux approches, on peut donc évaluer les coûts directs et indirects d'une politique donnée à différents horizons.

De plus, certains de ces modèles intègrent des mécanismes de déséquilibre, comme l'incertitude et les asymétries d'information. Cela est d'autant plus pertinent pour discuter les instruments de politique publique et évaluer les coûts sociaux des risques environnementaux, notamment ceux relatifs aux changements climatiques.

On distingue les modèles d'*optimisation politique* (qui cherchent à déterminer les politiques optimales), et les modèles de *simulation politique* (qui évaluent des mesures politiques spécifiques)<sup>15</sup>. Les modèles d'optimisation sont plutôt normatifs, dans le sens où ils s'efforcent de déterminer la politique idéale, en adoptant une approche coût-bénéfice (les coûts marginaux d'abattement sont rapportés aux bénéfices marginaux futurs de ces réductions). Les modèles de simulation visent à évaluer l'impact d'une politique spécifique déterminée de manière exogène. Ils sont donc plutôt de type descriptif.

Un exemple de modèle hybride est le modèle MERGE (*Model for Evaluating the Regional and Global Effects*) qui a été largement utilisé pour évaluer les effets globaux et régionaux des politiques climatiques (Manne et Richels, 2004). Il combine une représentation *bottom up* du secteur de l'offre d'énergie avec une formulation de l'économie globale de type équilibre général. Un autre modèle hybride est celui développé par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) : le modèle IMACLIM (*Impact Assessment of*

---

<sup>15</sup> Weyant et al. (1996), "Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results," dans Bruce et al. (Eds.), *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

*Climate Policies*)<sup>16</sup>, décliné en une version de projection statique (IMACLIM-S) et une version dynamique réursive (IMACLIM-R). IMACLIM-R projette l'économie comme une succession d'équilibres statiques annuels dont l'évolution est guidée par les dynamiques de croissance démographique, d'accumulation du capital et de changement technique. IMACLIM-R est utilisé pour réaliser des scénarios de long terme d'évolution des systèmes énergétiques ainsi que pour l'évaluation des politiques de réduction des émissions de GES. Le modèle E3MG (*energy-environment-economy model of the globe*)<sup>17</sup>, développé par le centre d'économétrie de l'université de Cambridge, est un modèle hybride original puisqu'il s'agit d'un modèle macroéconométrique appliqué à l'énergie incorporant une représentation détaillée des technologies. Il est par exemple utilisé pour évaluer l'impact des engagements contraignants de réduction des émissions de GES annoncés par les pays de l'Annexe I. Les modèles DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*) et RICE (*Regional Integrated model of Climate and the Economy*)<sup>18</sup> développés par Nordhaus (1994) représentent des modèles d'optimisation appliqués à la problématique des changements climatiques. DICE a été notamment utilisé pour comparer différentes options de politique climatique en fonction de leur efficience, ou pour analyser le rôle des taxes carbone. RICE quant à lui, a été employé pour évaluer l'efficacité et les impacts économiques de différents scénarios politiques de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

### 3. Prise en compte des caractéristiques spécifiques du changement climatique lors de l'évaluation de l'impact de la politique climatique

Les différents types de modèles présentés ci-dessus peuvent donc être utilisés pour estimer les coûts des politiques climatiques et identifier l'influence d'une variable (ou de sa modélisation) sur les impacts estimés de ces politiques. Une revue des méta-analyses proposée par Söderholm (2007)<sup>19</sup> souligne l'importance du type de modèle employé : deux types de modèle peuvent potentiellement générer des estimations différentes du fait des hypothèses sous-jacentes différentes.

La décision d'appliquer une approche *bottom up* ou plutôt *top down* peut fortement affecter les estimations des coûts macroéconomiques d'une politique climatique donnée. En effet, les modèles *bottom up* permettent d'identifier les opportunités les moins coûteuses pour réduire les émissions, *via* l'analyse détaillée des différentes technologies existantes qui est incorporée dans le modèle. Il est donc raisonnable de penser que les coûts d'abattement totaux estimés à partir de modèles *bottom up* seront inférieurs aux coûts totaux estimés par les modèles *top down* qui utilisent des données agrégées pour décrire les comportements sectoriels. Cela s'explique également par la plus grande adaptabilité des modèles technologiques à la modification de l'efficacité de certains facteurs, conséquente à la mise en œuvre d'une réglementation.

Si l'objectif de l'analyse porte sur l'impact économique d'une politique de lutte contre les changements climatiques, les caractéristiques mêmes de ce bien économique particulier vont permettre d'identifier la catégorie de modèles la plus appropriée. Par exemple, afin de modéliser un problème global et incertain, dont les impacts peuvent être ressentis à très long terme, les modèles *top down* et hybrides, semblent être plus pertinents que les modèles *bottom up*.

---

<sup>16</sup> Le modèle IMACLIM-R est décrit de manière plus détaillée dans l'annexe 3.

<sup>17</sup> Barker, T., H. Pan, J. Köhler, R. Warren, et S. Winne (2006), « Decarbonizing the Global Economy with Induced Technological Change: Scenarios to 2100 using E3MG », *The Energy Journal*.

<sup>18</sup> Le modèle RICE est décrit de manière plus détaillée dans l'annexe 4.

<sup>19</sup> Söderholm P. (2007), « Modelling the Economic Costs of Climate Policy », *Research Report 2007:14*, Luleå University of Technology.

Il faut également tenir compte des caractéristiques propres du modèle, car deux modèles *top down* peuvent fournir des estimations qui diffèrent d'un point de vue quantitatif, même s'ils demeurent cohérents d'un point de vue qualitatif. La revue faite par Söderholm (2007) montre que les modèles macroéconométriques génèrent des coûts de politique plus élevés que les modèles d'équilibre général du fait d'horizon temporel propre à chacun de ces deux types de modèles. Les modèles d'équilibre général calculable reflètent des valeurs obtenues sur le long terme, et ne tiennent donc pas compte des coûts d'ajustement de court et moyen terme, comme c'est le cas dans les modèles macroéconométriques. Ces derniers reconnaissent explicitement l'existence d'inefficacités transitionnelles. Il en résulte une prévision des coûts plus élevés que dans les modèles d'équilibre général calculable.

Certaines des hypothèses faites de manière implicites ou explicites dans ces modèles ont été identifiées comme ayant un impact particulièrement important sur les valeurs estimées (voir Bosello *et al.*, 1998<sup>20</sup>, et Söderholm, 2007). Il s'agit plus précisément de la modélisation des possibilités de substitution technologiques, du progrès technique, et de la trajectoire considérée. La prise en compte des prix de l'énergie et des échanges de permis d'émissions est également considérée avec une attention particulière dans cette section.

### 3.1 - Les possibilités de substitution technologiques

Les modèles économiques diffèrent dans leur manière de représenter les possibilités de substitution technologique. Ainsi, les modèles d'équilibre général spécifient des élasticités prix et revenus pour modéliser le comportement des agents économiques en réponse à la mise en place d'une mesure gouvernementale. Ce qui importe alors est l'ordre de grandeur du degré de substitution entre les facteurs de production. L'intégration de plusieurs secteurs dans le modèle permet une substitution efficace des facteurs de productions et des biens finaux. Plus les options de substitutions sont nombreuses, moins lourd sera le fardeau économique attaché à la mise en place de la politique climatique en question.

La plupart des modèles *top down* adoptent une fonction de production à élasticité de substitution constante (CES), à rendement constant par exemple dans MESANGE. Ces fonctions de production CES sont emboîtées dans le cas des modèles d'équilibre général appliqués aux changements climatiques, comme GEM-E3 et GEMINI-E3, et du modèle hybride MERGE. Cette spécification permet de bien prendre en compte l'impact d'une variation des prix, à travers les élasticités-prix directes et croisées, ainsi que les relations de complémentarité et/ou substituabilité entre les facteurs de production.

Le modèle hybride IMACLIM abandonne cette formulation de fonction de production agrégée au profit d'une reconstitution *bottom up* de la fonction de production. Aucune forme particulière de la fonction de production n'est spécifiée *a priori*. À chaque itération, le modèle définit la frontière des possibilités de production à partir de l'information contenue dans les données technologiques du module *bottom up* du modèle. Les estimations de coûts macroéconomiques obtenues par cette spécification de la fonction de production sont généralement moins biaisées que celles obtenus à partir de fonctions CES conventionnelles calibrées sur des données *bottom up* parce que cette approche prend explicitement en compte les variations de prix relatifs des différentes technologies.

Le modèle E3MG simule les processus de substitution des facteurs au travers de son module *bottom up* ETM en tenant compte du fait que de nombreuses alternatives économes en carbone sont en train d'émerger, bien que leurs coûts soient généralement supérieurs à ceux des combustibles fossiles. Le processus de substitution est supposé non-linéaire, présentant des effets de seuil, étant donné que les coûts de ces nouvelles technologies décroissent en fonction de l'innovation, de l'investissement et de l'apprentissage.

---

<sup>20</sup> Francesco Bosello, Carlo Carraro, and Claudia Kemfert (1998), « Advances of Climate Modelling for Policy Analysis », *FEEM Working Paper No. 82.98*.

### 3.2 - La modélisation du progrès technique

Dans le cadre d'une politique de réduction des émissions de GES, on s'intéresse au progrès technique en matière d'efficacité énergétique ; un accroissement se traduit par une réduction du coût marginal d'abattement et modifie donc le comportement d'abattement. Il s'ensuit une réduction des émissions de GES, par rapport à la situation de référence. Le fait de traiter le progrès technique de manière exogène (c'est-à-dire qu'il ne réagit pas aux variations des prix de l'énergie) ou endogène peut avoir un impact significatif sur les coûts de réduction des émissions.

Il est très difficile d'intégrer le progrès technique de manière endogène de par l'absence d'indicateur directement observable. Aussi, le progrès technique est-il souvent intégré dans la plupart des modèles sous forme d'une tendance autonome d'efficacité énergétique<sup>21</sup> (i.e. indépendante des conditions économiques qui prévalent) qui affecte la demande d'énergie ou la croissance du PIB (national ou global). Le principal problème qui se pose alors est que l'influence des décisions politiques sur le progrès technique n'est pas prise en compte. Cette situation limite donc l'analyse des politiques économiques, la seule réponse des agents économiques face à une augmentation du prix de l'énergie reposant uniquement sur les possibilités de substitutions.

Cette modélisation du progrès technique est retenue dans les modèles *bottom up* caractérisés par une absence d'aspects dynamiques et de rétroaction sur l'activité économique. Outre le fait que cela ne corresponde pas à la réalité économique, cela peut également résulter en une surestimation des possibilités technologiques réelles étant donné que ces modèles ont tendance à ignorer d'importantes barrières liées à la mise en œuvre de technologies « propres », e.g. coûts d'investissement, renforcement des capacités de l'entreprise. C'est également de cette manière que le progrès technique est intégré dans les modèles d'évaluation intégrée, notamment dans RICE, et dans les modèles macroéconométriques, comme EPPA ou MESANGE.

*A contrario*, le progrès technique est généralement endogène dans les modèles d'équilibre général, résultant de mesures gouvernementales ou d'investissement visant à améliorer l'efficacité énergétique. Cela permet d'élargir l'ensemble des possibilités de réponse des agents économiques face à la mise en place de ces mesures publiques. Face à une modification des prix des facteurs de production, les agents ne sont plus limités aux choix de substitution et peuvent désormais réagir en termes de choix de progrès technique (décision de R&D qui peut conduire à des innovations de procédés ou de produits, ou développement du capital humain).

Cette spécification est adoptée dans GEMINI-E3 (progrès technique endogène lié à une politique ou à un programme d'investissement donné). Dans GEM-E3, le progrès technique est à la fois exogène (*trend* temporel) et endogène (dépend des dépenses en R&D par les secteurs publics et privés ainsi que de la prise en compte des retombées de connaissance sur les différents agents économiques). Il faut également préciser que, dans les modèles d'équilibre général, le progrès technique est expliqué par le modèle, et dépend des décisions de réduction des émissions de GES.

Dans IMACLIM, le progrès technique est par définition endogène. Il dépend des interactions entre les variations des prix relatifs et les investissements cumulés. L'effet d'apprentissage et les mécanismes de R&D sont également des facteurs qui contribuent à la définition d'un progrès technique endogène. En revanche, le progrès technique est partiellement endogène dans le modèle E3MG, puisqu'il dépend à la fois des dépenses de R&D visant à augmenter les investissements et des effets d'apprentissage.

---

<sup>21</sup> Cette variable est supposée refléter l'ensemble des facteurs (à l'exception des substitutions prix) qui font que l'apport d'énergie dans un secteur de production donné croît plus lentement que la production de ce secteur. La valeur numérique de ce facteur exogène est généralement comprise entre 0 et 2 % par an (L. Bergman et M. Henrekson, « CGE modeling of environmental policy and resource management », 2003).

La manière d'envisager le progrès technique peut avoir des conséquences significatives sur l'analyse de l'efficacité d'une politique climatique. Si le progrès technique est considéré comme exogène, les résultats tendront à recommander d'attendre l'avènement de technologies futures plus efficaces avant de mettre en place la politique considérée. Si, à l'inverse, le progrès technique est considéré comme endogène, les estimations inciteront à la mise en place de la politique afin de stimuler et diffuser les technologies permettant d'atteindre l'objectif environnemental fixé.

Une méta-analyse réalisée par Barker *et al.* (2006)<sup>22</sup> montre que l'endogénéisation du progrès technique résulte en une réduction substantielle des coûts *ex ante* d'une politique de réduction des émissions polluantes, notamment lorsque le modèle prend en compte les effets d'externalités de connaissance (c'est-à-dire l'impact des transferts de connaissance, entre agents économiques, qui ne passent pas par le marché).

### 3.3 - La trajectoire du modèle

La trajectoire temporelle propre à chaque modèle peut également expliquer pourquoi deux modèles économiques mènent à des estimations différentes et peut être un déterminant significatif des coûts estimés d'une politique donnée. Ainsi, les modèles d'équilibre général fournissent des estimations de long terme, sans tenir compte des ajustements de court terme nécessaires pour atteindre l'objectif défini dans la politique en question. *A contrario*, les modèles macroéconométriques tiennent explicitement compte des coûts d'ajustement de court terme, et conduisent donc à des coûts globaux plus élevés que ceux produits par les modèles d'équilibre général.

Dans le cadre d'une politique de réduction des émissions de GES, la vision de long terme caractérisant les modèles d'équilibre général apparaît pertinente pour mesurer les bénéfices d'une politique climatique, ces derniers pouvant être complètement réalisés de nombreuses années après la mise en place de la politique en question. Cependant, il est également nécessaire de disposer d'estimations de ces coûts et bénéfices à court ou moyen terme, notamment si l'on souhaite réviser à mi-parcours des objectifs politiques. Dans cette situation, un modèle macroéconométrique constitue l'outil idéal car il tient compte des rigidités des marchés à court et moyen terme. Les modèles hybrides combinent les avantages de ces deux types de modèle.

Il est évident que les possibilités de substitution dépendent également de l'horizon temporel : les comportements de substitution sont plus faciles lorsque le temps nécessaire à l'ajustement est long. Aussi, les modèles d'équilibre général et hybrides présentent un avantage par rapport aux autres types de modèles *top down* puisque leur horizon temporel est plus long que celui considéré généralement par ces derniers : la période d'ajustement technologique pourra être intégralement prise en compte.

### 3.4 - Les échanges de permis d'émission et flux de capitaux

La prise en compte des échanges internationaux est fondamentale dans le contexte de la lutte contre le changement climatique, parce que, dans la mesure où les coûts marginaux de réduction ne sont pas géographiquement homogènes, il existe des possibilités de réduction des coûts par la mise en place de marchés du carbone. Dans une optique de développement du marché du carbone actuel à l'ensemble du monde, de tels échanges permettraient de réduire significativement les coûts totaux (et donc marginaux) d'abattement, pour mener à une égalisation de ces coûts entre les pays, ce qui facilite par la suite d'autant plus l'atteinte de l'objectif de réduction au niveau global.

---

<sup>22</sup> Barker, T., H. Pan, J. Köhler, R. Warren et S. Winne (2006), "Decarbonizing the global economy with induced technological change: scenarios to 2100 using E3MG", *The Energy Journal*, pp. 143-160.

La plupart des modèles économiques, qu'ils soient macroéconométriques ou d'équilibre général, prennent en compte les marchés de permis d'émissions dans leur modélisation. En fonction de l'objectif de réduction que s'est fixé un pays, ils sont en mesure d'estimer le prix du CO<sub>2</sub> observé sur les marchés carbone (qui s'interprète donc comme le coût marginal d'abattement), la répartition des permis entre secteurs et les impacts sectoriels qui en découlent.

Hourcade *et al.* (2001)<sup>23</sup> montrent que les coûts des politiques d'atténuation des changements climatiques dépendent fortement des hypothèses faites sur les échanges de permis d'émission. Les coûts sont en effet très bas lorsque le marché du carbone est le plus large possible (*i.e.* mondial) puisque les réductions sont faites là où il est le plus efficace de les faire (*i.e.* à moindre coût). Les coûts augmentent lorsque la taille du marché se réduit.

La modélisation des flux de capitaux entre les pays liés à la vente ou l'achat de permis d'émission peut s'avérer nécessaire lorsque l'on considère la possibilité d'échange de quotas d'émissions entre pays et le partage des efforts de réduction entre les pays. Cependant, ces flux sont souvent considérés dans la plupart des modèles économiques comme exogènes, sans aucun lien avec les autres composantes structurelles de l'économie.

### **3.5 - Autres variables pouvant influencer sur le coût d'une politique climatique**

#### **a) Le prix des énergies**

Le prix des énergies fossiles intensives en carbone est une variable clé de l'évaluation d'une politique climatique. En effet, pour remplir l'objectif de la politique climatique de réduire les émissions de GES, le choix de l'instrument optimal (taxes ou permis négociables) se traduira directement ou indirectement sur le prix des énergies fossiles. Par exemple, une taxe carbone visant à réduire les consommations de combustibles et carburants fossiles afin d'inciter les agents économiques à s'orienter vers des comportements et des choix plus sobres en carbone va renchérir le prix de ces combustibles afin d'en dissuader l'usage. Symétriquement, les évolutions du prix des énergies auront un impact sur les choix technologiques.

Dans les modèles macroéconométriques comme MESANGE (dans son modèle de base) ou GMM, le prix des énergies n'est pas modélisé : il est exogène. Dans le modèle MESANGE comme dans la plupart des autres modèles macroéconométriques opérationnels, l'unique déterminant du prix des importations énergétiques est le prix du pétrole, qui constitue l'ancrage du prix modélisé à long terme et influe également sur la dynamique de court terme.

Les modèles d'équilibre général ou hybrides déterminent le prix des énergies de manière endogène : les prix résultent d'une confrontation de l'offre et de la demande sur les différents marchés. Différents types de marchés (*e.g.* autres que la concurrence pure et parfaite) peuvent être considérés dans GEM-E3. Dans IMACLIM, le prix du pétrole reflète le niveau de tension entre offre et demande et l'évolution du prix du gaz est indexée sur celle du pétrole via un coefficient d'indexation décroissant calibré sur les résultats du World Energy Model (AIE, 2007). En ce qui concerne le charbon, son prix et sa trajectoire de prix sont déterminés à partir des capacités de production régionales et de l'évolution des coûts de production.

L'impact sur le coût de la politique dépendra des ressources naturelles propres à chaque pays (Hourcade *et al.*, 2001). Ainsi, un pays qui dispose naturellement de gisements importants de combustibles fossiles pourra facilement et à bas coût remplacer le charbon par du gaz, et a donc un plus grand potentiel de réduction des émissions que les pays pauvres en combustibles fossiles.

---

<sup>23</sup> Hourcade, J.-C., P. Shukla et al. (2001), "Global, Regional, and National Costs and Ancillary Benefits of Mitigation", Chapter 8 of WG III Mitigation Report of IPCC Third Assessment Report.

## b) La population

Alors que la population est étroitement liée aux émissions de GES, la population et le taux de croissance démographique sont généralement exogènes dans les modèles macroéconomiques. Ces modèles ne sont en effet pas adaptés aux prévisions démographiques. La population active suit donc une tendance exogène fondée sur des estimations faites par les Nations Unies. Dans IMACLIM, ces estimations sont corrigées par les flux de migration afin de stabiliser les populations des régions où le taux de fécondité est bas.

## c) Les facteurs de la croissance économique

La structure du processus de croissance est déterminante lorsque l'on s'intéresse aux questions de réchauffement global étant donné que l'on va considérer des pays à niveaux de croissance et de développement différents. Dans la vision classique, la croissance de long terme dépend du taux de croissance de la main d'œuvre et du taux exogène de progrès technique.

Le modèle MESANGE, modèle macroéconométrique de type « néo-keynésien », présente des caractéristiques de court et de long terme distinctes : l'équilibre de courte période est pour une large part déterminé par les comportements de demande mais tient compte de coûts d'ajustement et d'un certain degré de rigidité des prix à court terme ; l'équilibre de long terme présente des caractéristiques classiques et converge vers un sentier de croissance où le taux de croissance dépend de la démographie et du progrès technique.

Dans les modèles d'équilibre général, la croissance économique est essentiellement déterminée par les hypothèses faites sur l'épargne agrégée, le progrès technique et la croissance de la force de travail dans les différentes régions du monde. Par exemple, le modèle EPPA développe des projections du PIB à partir de l'accumulation du capital et du progrès technique. La composition sectorielle de l'économie est supposée varier au cours du temps, notamment en raison des modifications des schémas de consommation avec le développement économique.

Les modèles hybrides se définissent généralement comme des modèles de croissance optimale du type Ramsey ou Solow. Les décisions de consommation et d'épargne inter-temporelles déterminent le sentier de croissance de long terme à suivre, bien qu'elles soient elles-mêmes largement dépendantes du choix d'un taux d'actualisation de l'*utilité*, taux qui représente la préférence sociale pour le présent entre les différentes générations. À la différence de la vision classique, la croissance est endogène au sens où elle ne dépend que des seuls comportements des agents et des variables macroéconomiques.

Dans le modèle hybride IMACLIM, la dynamique économique est décrite comme une succession d'équilibres statiques : chaque équilibre statique est une représentation de l'économie à une date ou une période donnée ; la dynamique de l'économie est représentée à travers l'évolution des variables sur une succession d'équilibres. Le moteur de la croissance macroéconomique se compose alors (i) des tendances démographiques dérivés des estimations de l'ONU et corrigés des flux migratoires permettant de stabiliser la population dans les régions à faible taux de fertilité; (ii) de la productivité du travail gouvernée par des tendances exogènes ou endogènes de productivité globales (selon les versions du modèle) et par les mécanismes de dépréciation du capital; (iii) de la dynamique des capacités de production selon la loi classique d'accumulation du capital laquelle dépend de la règle d'allocation des investissements, d'un taux d'épargne exogène et à des flux de capitaux généralement exogènes.

Le modèle RICE est une extension du modèle de croissance optimale de Ramsey qui inclut les dépenses de réduction d'émissions, interprétées comme un investissement. C'est un modèle d'optimisation : chaque région/pays est supposée maximiser sa fonction de bien être social qui détermine les choix de consommation et d'investissement. Cette fonction de bien être social est croissante avec la consommation par tête de chaque génération, avec une utilité marginale décroissante de la consommation. L'accumulation du capital est déterminée en optimisant le flux de consommation au cours du temps.

#### d) Les imperfections du marché

De nombreuses imperfections du marché peuvent significativement atténuer l'efficacité d'un instrument économique, dont l'objectif est par exemple d'envoyer un signal prix. On peut citer à cet égard les conditions de concurrence imparfaite (e.g. prix régulés sur certains marchés) ; les asymétries d'information ; et les externalités négatives.

Les modèles macroéconométriques tiennent compte de certaines rigidités du marché de par leur filiation « néo-keynésienne » et de développements récents afin de mieux représenter la réalité économique. Ainsi, MESANGE suppose l'existence de rigidités des prix et des salaires à court terme.

Les modèles d'équilibre général posent couramment une hypothèse de concurrence imparfaite sur l'échange international. En effet, l'hypothèse d'Armington selon laquelle les biens sont différenciés selon leur origine géographique est généralement adoptée, comme par exemple dans GEM-E3, GEMINI-E3 et EPPA.

Les modèles hybrides tiennent explicitement compte des imperfections du marché, notamment les externalités de connaissance et technologiques. Ceci est également lié à l'hypothèse de progrès technique endogène : les investissements réalisés en matière de R&D notamment peuvent générer des externalités positives sur les rendements du capital physique et du capital humain. De fait, l'existence d'externalités positives se répercute sur les coûts marginaux des autres facteurs de production qui peuvent alors décroître. Le processus d'apprentissage fait décroître le coût en capital des technologies, et les rendements augmentent avec l'investissement cumulé. La possibilité de rendements d'échelle croissants, hypothèse de la théorie de la croissance endogène sur laquelle reposent les modèles hybrides, remet en cause la règle d'équilibre par les prix, et justifie la recherche d'optimums de second rang.

Par exemple, IMACLIM modélise diverses situations sous-optimales, causées notamment par des inerties à différents niveaux (équipements, techniques, préférences, flux commerciaux ou flux de capitaux) ; par l'utilisation incomplète des facteurs de production, entraînant par exemple des surcapacités de production dans certains secteurs et des sous capacité dans d'autres et créant ainsi des tensions sur les prix et les quantités ; par l'absence de plein emploi en raison des rigidités du marché du travail ; et par des distorsions créées par certaines taxes préexistantes. Ces situations sous-optimales autorisent alors l'existence de chômage structurel, une hypothèse clé de ce modèle.

## 4. Exemples d'application de ces modèles à l'évaluation de politiques climatiques

Cette section présente les résultats de quatre études utilisant l'un des trois types de modèles économiques considérés jusqu'ici afin d'évaluer différentes politiques climatiques à titre illustratif.

### 4.1 - Estimation de la valeur du carbone sur les secteurs hors ETS

En Décembre 2008, le Parlement Européen a adopté le paquet climat énergie qui révisé la Directive ETS, avec un objectif de réduction globale des émissions de CO<sub>2</sub> de 21 %, par rapport à 2005, à l'horizon 2020. En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES) non couvertes par l'EU ETS, des réductions propres à chaque État membre ont été déterminées en fonction du PIB par tête de chaque État. Ainsi, d'ici 2020, la France devra réduire de 14 % ses émissions de GES émises par le secteur hors ETS par rapport aux niveaux d'émission de 2005.

Bernard et Vielle<sup>24</sup> ont réalisé des simulations visant à estimer la valeur carbone qui sera effective sur le secteur hors ETS compte tenu du scénario prévu dans le paquet climat-énergie. Le modèle utilisé pour les simulations est GEMINI-E3, un modèle d'équilibre général dynamique et récursif, à plusieurs secteurs et plusieurs pays/régions.

#### a) Scénarios testés

Les simulations prennent en compte l'objectif européen de réduction de 21 % des émissions de GES du marché ETS, et l'objectif français de réduction de 14 % des émissions non ETS, par rapport au niveau des émissions de 2005. Le scénario tient également compte de la possibilité d'échanger 5 % des objectifs hors ETS avec d'autres États membres, ainsi que l'utilisation annuelle des crédits Kyoto (de type MDP ou MOC) de l'ordre de 3 % des émissions 2005.

Trois scénarios alternatifs sont envisagés dans cette étude, définis comme suit :

- Scénario 1 : pas de recours aux mécanismes de flexibilité (*i.e.* sans MDP) ;
- Scénario 2 : possibilité de recours au MDP uniquement pour la France ;
- Scénario 3 : possibilité de recours au MDP pour l'ensemble des pays de l'UE<sup>25</sup>.

#### b) Principaux résultats

Les simulations obtenues avec le modèle GEMINI-E3 sur la base des engagements européens donnent une valeur de la tonne de CO<sub>2</sub> pour le secteur ETS de 33€ et de 92€ pour le secteur non-ETS en France, à l'horizon 2020 (voir tableau 1). Cet écart (d'ordre 3) traduit des disparités évidentes en termes de coût marginal d'abattement qui existent entre ces deux secteurs. À titre d'indication, la valeur de la tonne de CO<sub>2</sub> sur le secteur non-ETS serait de 281€, si les États n'avaient pas la possibilité d'échanger entre eux une certaine part de leurs quotas et ne pouvaient pas recourir aux crédits de projet de type MDP.

**Tableau 1. Trajectoire de la valeur estimée du carbone sur les secteurs ETS et hors ETS (en Euros 2008)**

|            | Valeur d'une tonne de CO <sub>2</sub> | 2008 | 2010 | 2015 | 2020 |
|------------|---------------------------------------|------|------|------|------|
|            | Prix ETS                              | 3€   | 7€   | 17€  | 33€  |
| Scénario 1 | Prix hors ETS                         | 0€   | 8€   | 38€  | 149€ |
| Scénario 2 | Prix hors ETS                         | 0€   | 8€   | 19€  | 92€  |
| Scénario 3 | Prix hors ETS                         | 0€   | 8€   | 19€  | 92€  |

Bien que le fait d'intégrer des mécanismes de flexibilité, tels que l'échange de 5 % des quotas entre États Membres et le recours à 3 % des crédits projets (de type MDP), permette de réduire significativement le coût marginal d'abattement des émissions de GES hors ETS, les distorsions entre marché européen ETS et marchés nationaux non-ETS qui sont générées par la distinction des objectifs pour ces deux secteurs demeurent.

Ainsi, le coût d'abattement hors ETS pourrait ainsi être de 92€ en 2020 en France, 23€ en Allemagne, et de 165€ au Royaume-Uni. Pour la France, cette valeur est bien supérieure à la valeur tutélaire de 56€ évaluée par la Commission Quinet (valeur déterminée avant la fixation d'objectifs nationaux hors ETS).

<sup>24</sup> A. Bernard et M. Vielle (2008), « Évaluation du paquet énergie-climat à l'aide du modèle GEMINI-E3 », Rapport pour le MEEDDM.

<sup>25</sup> Ce scénario correspond aux caractéristiques exactes du paquet climat énergie tel qu'adopté en décembre 2008.

Les auteurs évaluent également l'impact environnemental du paquet climat-énergie (voir tableau 2). On vérifie premièrement, que les émissions de CO<sub>2</sub> sont moins importantes lorsque l'on ne permet pas le recours aux mécanismes de flexibilité et deuxièmement, que plus le recours est étendu, moins les émissions seront réduites.

**Tableau 2 – Emissions de CO<sub>2</sub> (exprimées en Mt) selon les 3 scénarios considérés**

|            | Pays   | 2008    | 2010    | 2015    | 2020    |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Scénario 1 | France | 518 Mt  | 517 Mt  | 489 Mt  | 450 Mt  |
|            | UE     | 4530 Mt | 4494 Mt | 4326 Mt | 4159 Mt |
| Scénario 2 | France | 518 Mt  | 517 Mt  | 500 Mt  | 460 Mt  |
|            | UE     | 4530 Mt | 4497 Mt | 4338 Mt | 4169 Mt |
| Scénario 3 | France | 518 Mt  | 519 Mt  | 500 Mt  | 460 Mt  |
|            | UE     | 4530 Mt | 4506 Mt | 4365 Mt | 4194 Mt |

## 4.2 - Évaluation de l'impact macroéconomique de la hausse des prix des énergies au Royaume-Uni

Une étude de l'impact de la hausse des prix des énergies sur l'économie britannique a été réalisée par l'institut de prévision économique d'Oxford (*Oxford Economic Forecasting*) à partir du modèle macroéconométrique GMM.

### a) Scénarios considérés

Pour ce projet, 4 scénarios ont été testés :

- Scénario 1 : une hausse de 30 % du prix de toutes les énergies finales, d'abord uniquement au Royaume-Uni (scénario 1a), puis pour le reste de l'Europe (scénario 1b), et enfin dans le monde entier (scénario 1c) ;
- Scénario 2 : une hausse de 10 % (scénario 2a) et de 30 % (scénario 2b) du prix du pétrole brut ;
- Scénario 3 : une hausse de 10 % (scénario 3a) et de 30 % (scénario 3b) du prix du gaz ;
- Scénario 4 : une hausse du prix du quota CO<sub>2</sub> de 15€/tCO<sub>2</sub> sur le marché ETS.

### b) Principaux résultats

L'impact sur le PIB et l'emploi est mesuré pour 2010 et 2020. Le tableau 3 présente les résultats obtenus pour les différents scénarios. On constate que tous les scénarios conduisent à une hausse des prix des énergies qui a un impact négatif sur le PIB. Quand une seule source d'énergie est affectée, l'impact négatif est relativement limité et ne dure pas, les entreprises et les consommateurs substituant la source d'énergie impactée par d'autres énergies. Quand toutes les sources d'énergies sont affectées, l'impact négatif sur le PIB perdure, et est plus prononcé lorsqu'il s'agit d'un choc spécifique au Royaume-Uni que lorsqu'il s'agit d'un choc global.

**Tableau 3 – Impacts sur le PIB et l'emploi de la hausse du prix des énergies selon différents scénarios**

| Scénarios   | 2010    |            | 2020    |            |
|-------------|---------|------------|---------|------------|
|             | PIB (%) | Emploi (%) | PIB (%) | Emploi (%) |
| Scénario 1a | -0,8    | -0,3       | -2,1    | -0,8       |
| Scénario 1b | -1,2    | -0,5       | -1,6    | -0,5       |
| Scénario 1c | -1,3    | -0,5       | -1,1    | -0,3       |
| Scénario 2a | -0,1    | 0          | 0       | 0          |
| Scénario 2b | -0,3    | -0,1       | -0,1    | 0          |
| Scénario 3a | -0,1    | -0,1       | 0       | 0          |
| Scénario 3b | -0,4    | -0,2       | -0,1    | 0          |
| Scénario 4  | -0,1    | 0          | -0,1    | 0          |

### 4.3 - Évaluation de mécanismes sectoriels pour les pays en développement

Etant donné que les pays en développement refusent de participer à un marché global d'échange de permis d'émissions de CO<sub>2</sub>, des approches sectorielles ont été envisagées lors des négociations internationales sur le climat, notamment par l'UE. Cependant, rares sont les évaluations de ces propositions.

A partir du modèle hybride IMACLIM, Hamdi-Chérif *et al.* (2010)<sup>26</sup> évaluent les impacts environnementaux et économiques d'un mécanisme sectoriel visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur électrique qui serait mis en place dans les pays en développement uniquement, alors que les pays développés poursuivraient des engagements de type Kyoto.

#### a) Scénarios considérés

Cinq scénarios ont été testés dans cette étude :

- Scénario 1 : scénario de continuité (dit de *business as usual* – BaU) où aucune politique climatique n'est mise en place ;
- Scénario 2 : un système global d'échange de permis d'émissions de type *cap-and-trade* est mis en place en 2013 pour limiter les concentrations de CO<sub>2</sub> à 450 ppm. Les permis sont vendus aux enchères. Les revenus issus de ces enchères sont redistribués aux entreprises sous forme de baisse des taxes existantes, à l'exception des revenus issus des permis achetés par le secteur électrique qui sont quant à eux redistribués aux ménages sous forme forfaitaire ;
- Scénario 3 : le système d'échange de permis du scénario 2 est mis en place uniquement dans les pays de l'Annexe I ;
- Scénario 4 : le système d'échange de permis du scénario 2 est mis en place dans les pays de l'Annexe I et les pays en développement mettent en place un système d'échange de permis restreint au secteur de l'électricité. Les permis du secteur électrique sont vendus aux enchères et les revenus de cette vente sont redistribués aux ménages ;
- Scénario 5 : scénario identique au scénario 4 mais les revenus des enchères sont entièrement redistribués aux entreprises sous forme de baisse des taxes existantes.

<sup>26</sup> M. Hamdi-Cherif, C. Guivarch, et P. Quirion (2010), "Sectoral Targets for Developing Countries: Combining 'Common but Differentiated Responsibilities' with 'Meaningful participation'", Document de travail n° 426 de la Fondation Eni Enrico Mattei.

## b) Principaux résultats

L'étude trouve le résultat standard selon lequel les émissions de CO<sub>2</sub> sont au plus bas dans le scénario 2. De plus, les mécanismes sectoriels (scénarios 4 et 5) permettent d'atteindre un niveau de réduction équivalent à 80 % de celui du scénario 2, par rapport au BaU<sup>27</sup>. Enfin, les émissions sont sensiblement plus élevées dans le scénario 5 que dans le scénario 4, étant donné que le scénario 5 compense quelque peu l'augmentation du coût de l'électricité en redistribuant les revenus aux entreprises.

En outre, les pertes de PIB transitoires dans les pays en développement sont significatives : les pertes les plus marquées sont observées en 2018 dans les scénarios 2 (-3,5 %) et 4 (-2,2 %), puis le PIB rattrape son niveau tendanciel, du fait notamment du progrès technique et d'une moindre sensibilité à la hausse du prix du pétrole. Dans le scénario 3, les pays en développement n'enregistrent pas de baisse de leur PIB du fait notamment de la baisse des prix mondiaux des énergies fossiles.

La principale conclusion de l'étude est qu'un mécanisme sectoriel dans les pays en développement permettrait de réduire significativement leurs émissions de CO<sub>2</sub> et aurait des impacts économiques moins sévères qu'un système global de *cap-and-trade*.

### 4.4 - Comparaison de trois modèles évaluant l'objectif 20-20-20 de l'UE

Afin de limiter la hausse des températures à 2°C au dessus des niveaux préindustriels, l'UE a mis en œuvre une politique climatique visant à réduire ses émissions de GES de 20 % en 2020 par rapport à 1990. Deux objectifs complémentaires ambitionnent de porter à 20 % la part d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale de l'UE d'ici 2020 et d'accroître l'efficacité énergétique afin d'économiser 20 % de la consommation énergétique de l'UE par rapport aux projections pour l'année 2020. On parle alors de l'« objectif 20-20-20 ».

Böhringer *et al.* (2009)<sup>28</sup> proposent d'évaluer l'impact d'une version simplifiée de la politique climatique de l'UE sur les émissions de CO<sub>2</sub>, sur le bien-être et sur le prix du permis d'émissions dans le cadre de l'exercice EMF 22<sup>29</sup> à partir de trois modèles d'équilibre général multirégionaux et multisectoriels : DART, PACE et GEMINI-E3.

#### a) Scénarios testés

3 scénarios sont considérés dans cette étude :

- Scénario 1 : aucune politique climatique n'est mise en place (BaU) ;
- Scénario 2 : objectif de réduction des émissions de 20 % en 2020 par rapport à 1990 ;
- Scénario 3 : objectifs de réduction des émissions de 20 % (par rapport à 1990) et de 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale de l'UE d'ici 2020.

Trois variantes sont considérées pour les scénarios 2 et 3 : un prix unique du carbone dans l'UE ; un prix européen du carbone distinct sur l'ETS et le non-ETS ; un prix européen du carbone sur l'ETS et de prix différenciés entre États membres sur le non-ETS.

---

<sup>27</sup> Les scénarios 2, 4 et 5 résultent en une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> respective de 32 % et de 26 % par rapport au BaU.

<sup>28</sup> C. Böhringer, T.F. Rutherford et R.S.J. Tol (2009), "The EU 20/20/2020 Targets: An overview of the EMF22 assessment", *Energy Economics*, Vol. 31, pp 268–273.

<sup>29</sup> L'EMF (Energy Modelling Forum) de l'Université de Stanford est un exercice international de comparaison de modèles énergétiques. L'EMF 22 fait référence au 22<sup>ième</sup> exercice de ce forum qui porte spécifiquement sur l'impact de politiques climatiques retardées afin de déterminer l'importance du délai selon différents niveaux d'effort de réduction.

## b) Principaux résultats

En termes d'impact de la politique climatique sur les émissions de CO<sub>2</sub>, les hypothèses sous-jacentes des modèles accentuent plus ou moins l'objectif de réduction à atteindre (scénario 2). Par exemple, dans le modèle DART qui suppose une croissante importante des émissions en 2020 par rapport au deux autres modèles, les émissions de l'ETS doivent être réduites de 38 % et celles du non-ETS de 26 % par rapport au scénario BaU pour atteindre l'objectif de -20 %. Dans GEMINI-E3 (respectivement PACE), il faut réduire les émissions ETS de 34 % (de 29 %) et les émissions non-ETS de 17 % (de 18 %) par rapport au scénario BaU pour atteindre l'objectif Européen.

Dans GEMINI-E3, le prix du carbone est quasiment identique sur l'ETS et le non-ETS, alors que DART et PACE trouvent un prix du carbone sur le non-ETS supérieur à celui observé sur l'ETS<sup>30</sup>. Cela peut s'expliquer par la définition dans ces deux modèles de fonctions de coût d'abattement plus pentues pour le secteur non-ETS que pour l'ETS.

On constate également qu'une politique de second-rang (deux prix du carbone au lieu d'un seul) accroît son coût (exprimé en termes de pertes de bien-être) : +14 % dans DART et +53 % dans PACE. Si les prix du CO<sub>2</sub> sur le non-ETS sont différents dans chaque Etat membre, le coût de la politique croît davantage : +39 % selon GEMINI-E3 et +15 % selon DART, par rapport à un prix unique sur le non-ETS au niveau européen.

L'objectif de « 20 % de renouvelables » (scénario 3) permet en soi de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. La politique climatique peut donc être moins contraignante, ce qui induit une baisse du prix du permis d'émissions allant de 3 % (GEMINI-E3) à 22 % (DART).

Les auteurs notent que ces résultats sont largement supérieurs à ceux estimés dans l'étude d'impact menée pour la Commission Européenne (Capros *et al.*, 2008)<sup>31</sup>. La principale conclusion de l'étude est qu'une politique climatique peut ne pas coûter beaucoup. En revanche, une mauvaise mise en œuvre peut générer des coûts additionnels, qui peuvent être modestes en valeur absolue mais substantiels au regard de la politique optimale d'un prix unique du carbone.

### 4.5 - Leçons à tirer de ces applications

Etant données les différences qui existent entre les modèles et les estimations obtenues, et l'incertitude qui prédomine sur de nombreux facteurs relatifs au changement climatique, il semble préférable de considérer des intervalles de valeurs plutôt que de se fonder sur des valeurs uniques pour éclairer la prise de décision.

Les divergences dans les résultats des modèles reflètent d'une part les incertitudes relatives au futur, et d'autre part celles relatives aux aspects méthodologiques (e.g. données manquantes). Il faut cependant s'accorder sur le fait qu'il n'y a pas d'approche ou de résultat unique.

Au vu de l'écart que l'on peut observer entre les estimations d'une même classe de modèles, il est recommandé d'utiliser les résultats d'études comparant plusieurs types de modèles (comme les exercices EMF) plutôt que les résultats provenant d'un seul modèle, afin de garantir un certain degré de cohérence dans les définitions et les valeurs de référence.

---

<sup>30</sup> Dans GEMINI-E3, le prix d'une tonne de CO<sub>2</sub> est proche de 70€ sur l'ETS et le non-ETS. Dans DART, le prix sur l'ETS est estimé à environ 25€/tCO<sub>2</sub>, alors que le prix sur le non-ETS est de l'ordre de 82€/tCO<sub>2</sub>. Dans PACE, une tonne de CO<sub>2</sub> vaut autour de 24€ sur l'ETS et plus de 100€ sur le non-ETS.

<sup>31</sup> P. Capros, L. Mantzos, V. Papandreou et N. Tasios (2008), "Model-based analysis of the 2008 EU policy package on climate change and renewable", E3MLab, Université d'Athènes.

## 5. Conclusions sur le choix du modèle pour estimer les coûts d'une politique climatique

Le premier constat est qu'il n'existe pas un modèle unique permettant d'appréhender l'ensemble des interactions entre les sphères économique, énergétique et climatique. L'alternative la plus intéressante se trouve dans la combinaison des approches *bottom up* et *top down*, en tenant compte autant que possible de la multidisciplinarité nécessaire dans ce domaine.

Cette combinaison d'approche, appelée également *hybridation*, conçoit des modèles hybrides qui permettent d'accroître la pertinence des résultats en tenant compte des spécificités de la réalité économique, omises par souci de simplicité dans la théorie néo-classique sur laquelle repose la plupart des modèles économiques. Bien que ces modèles hybrides soient encore perfectibles, ils apportent un regard nouveau et plus proche de la réalité économique, et permettent d'éclairer de manière pertinente la prise de décision.

Si l'objectif est d'évaluer les impacts macroéconomiques des politiques climatiques à long terme, que ce soit au niveau national, régional ou international, les modèles d'équilibre général et les modèles hybrides semblent particulièrement adaptés. Leur vision agrégée de l'ensemble des activités économiques, l'horizon de long terme qui les caractérise, leur approche qui permet d'intégrer différents scénarios politiques et, pour les modèles hybrides, certaines imperfections du marché, ainsi que la modélisation des différents paramètres clés (notamment l'endogénéisation du progrès technique) sont autant d'avantages qui permettent une modélisation satisfaisante des interactions économie-énergie-climat. Bien que les modèles d'équilibre général bénéficient d'une plus grande expérience et pratique dans le domaine de l'économie de l'environnement, les modèles hybrides semblent très prometteurs.

L'application récente des modèles GEMINI-E3 et IMACLIM au calcul d'une valeur tutélaire du carbone souligne la pertinence particulière de ces deux modèles à évaluer l'impact de politiques de réduction des émissions de GES, que ce soit au niveau national, régional ou international.

Si l'objectif est d'évaluer l'impact d'une politique climatique à court ou moyen terme, alors les modèles macroéconométriques et hybrides sont recommandés. Ceci peut être utile notamment lorsque l'on souhaite évaluer l'efficacité de la politique à mi-parcours ou la modifier. Ils permettent en effet de tenir compte des imperfections des marchés à court et moyen terme, et donc des coûts d'ajustement requis pour atteindre l'équilibre de long terme. Les modèles hybrides présentent cependant un avantage sur les modèles macroéconométriques puisqu'ils considèrent le progrès technique comme endogène par nature. Plus particulièrement, la structure récursive du modèle IMACLIM constitue une représentation intéressante du processus de croissance, combinant variations économiques de court terme et évolution dynamique de long terme des moteurs de la croissance.

Le tableau 4 résume les forces et faiblesses des différentes catégories de modèles économiques en référence à une évaluation du coût macroéconomique des politiques climatiques<sup>32</sup>. On voit ainsi que les modèles d'équilibre général ainsi que les modèles hybrides possèdent un avantage significatif sur les autres catégories de modèles dans la perspective d'évaluer les politiques climatiques.

---

<sup>32</sup> Une comparaison plus détaillée est proposée en annexe 5.

**Tableau 4. Forces et faiblesses des différents types de modèles en fonction de certaines variables clés**

|                                                      | Modèles macroéconométriques |         | Modèles d'équilibre général |        |           | Modèles hybrides |       |      |           |
|------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|--------|-----------|------------------|-------|------|-----------|
|                                                      | GMM                         | MESANGE | EPPA                        | GEM-E3 | GEMINI-E3 | RICE             | MERGE | E3MG | IMACLIM-R |
| Répartition Géographique                             | +++                         | --      | +++                         | +++    | -         | +                | +++   | +++  | ++        |
| Secteurs                                             | -                           | -       | ++                          | ++     | ++        | -                | -     | ++   | +         |
| Horizon de projection                                | -                           | +       | +                           | +      | +         | ++               | ++    | ++   | ++        |
| Progrès technique endogène                           |                             | -       | -                           | +      | ++        | -                | -     | +    | ++        |
| Fonction de production                               | -                           | -       | +                           | +      | +         | +                | +     | -    | ++        |
| Principaux facteurs de production                    | ++                          | +       | ++                          | +      | ++        | ++               | ++    | +    | +         |
| Échanges internationaux de permis de CO <sub>2</sub> | -                           | -       | -                           | ++     | ++        | ++               | ++    | ++   | ++        |
| Mesure du bien-être                                  | -                           | -       | ++                          | ++     | ++        | +                | ++    | -    | ++        |
| Externalités environnementales                       | -                           | -       | +                           | ++     | +         | -                | ++    | -    | ++        |

## **Annexe 1 : Description du modèle macroéconométrique MESANGE**

Le modèle MESANGE (Modèle économétrique de simulation et d'analyse générale de l'économie) est un modèle macroéconométrique trimestriel de l'économie française à trois secteurs développé conjointement par la Direction Générale du Trésor (DG Trésor) et l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee). Il se caractérise par une dynamique keynésienne à court terme et un équilibre de long terme déterminé par des facteurs d'offre. Dans cette optique, l'équilibre de court terme est pour une large part déterminé par les comportements de demande. À cet égard, MESANGE suppose l'existence de coûts d'ajustement ainsi qu'un certain degré de rigidité des prix à court terme. À long terme en revanche, le modèle présente des caractéristiques classiques. En simulation, le modèle converge vers un sentier de croissance équilibré où le taux de croissance dépend de la démographie et du progrès technique. La réconciliation des dynamiques de court terme et des spécifications de long terme repose sur l'estimation d'équations économétriques à correction d'erreur.

De manière usuelle dans ce type de modèle, l'économie française y est modélisée sous la forme d'une petite économie ouverte au sens où l'environnement international est supposé exogène. Trois secteurs d'activité sont distingués : l'industrie manufacturière, le secteur marchand non manufacturier (qui regroupe les services marchands, l'agriculture, le secteur énergétique et celui de la construction), et le secteur des services administrés. Les taux d'intérêt, les taux de change de la monnaie nationale par rapport aux monnaies étrangères, la demande publique, la population active et l'évolution du progrès technique constituent les principales autres variables exogènes du modèle.

MESANGE est mobilisé généralement pour simuler et évaluer des mesures de politique économique (utilisation dite en « variantes »). Le modèle a été complété afin d'évaluer certaines politiques environnementales : un module « énergie » qui modélise explicitement les comportements de consommation en énergie des ménages et des entreprises, les prix de l'énergie ainsi que les taxes portant sur ce type de produits a été créé. Le module énergie permet en particulier d'isoler les consommations en énergie au sein des consommations en produits non manufacturés des ménages et des entreprises, en y associant des équations de comportement. Les prix hors taxes (hors TVA et hors taxe énergétique) de consommation en énergie des ménages et des entreprises font également l'objet d'une modélisation économétrique spécifique.

MESANGE n'intègre pas les externalités liées à la mise en œuvre de politiques environnementales ni leur impact sur la structure sectorielle de l'économie, l'innovation, les techniques de production ou le progrès technique. En revanche, le modèle permet de simuler les effets de ces politiques sur l'économie française telle qu'elle se caractérise aujourd'hui (effets de court et moyen terme) à structure de production donnée.

## Annexe 2 : Description du modèle d'équilibre général GEMINI-E3

Le modèle GEMINI-E3 (*General Equilibrium Model of International-National Interaction for Economy-Energy-Environment*), développé par le Commissariat à l'énergie atomique sous la supervision d'Alain Bernard et Marc Vielle. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général calculable de l'économie mondiale, dynamique et récursif à plusieurs secteurs et plusieurs pays/régions. GEMINI-E3 a été spécifiquement conçu pour produire les éléments d'appréciation macro-économique pertinents dans l'évaluation des politiques énergétiques et environnementales telles que celles liées au changement climatique.

Le modèle GEMINI-E3, dont la création remonte à 1992, a fait l'objet de plus d'une trentaine d'utilisations sur des sujets aussi divers que la mise en place du protocole de Kyoto, l'impact économique et environnemental d'un moratoire nucléaire français, l'évaluation de la directive européenne sur les quotas d'émission. Il a été mis à contribution par la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre en 2000 pour la détermination de la taxe carbone devant être appliquée pour respecter le protocole de Kyoto, et ses évaluations ont été reprises dans plusieurs rapports de l'administration publique française ayant trait aux politiques de changement climatique.

### Structure et fonctionnement du modèle

GEMINI-E3 décrit l'ensemble des secteurs de l'économie mondiale, et utilise une nomenclature en 18 secteurs/produits. Le modèle décrit pour chacun des secteurs un équilibre ressources-emplois détaillant d'un côté la production et les importations, de l'autre les utilisations finales du bien (consommation des ménages, exportation, investissement) de même que les consommations intermédiaires. Pour chaque secteur il représente les facteurs utilisés pour réaliser la production (travail, capital, énergie, autres consommations intermédiaires). Le modèle calcule en outre l'ensemble des échanges internationaux de biens et services, et les émissions de GES des différentes activités économiques.

La description de la production fait appel à des CES emboîtées. En effet, l'utilisation de formes flexibles, telles les fonctions Translog ou Léontieff, est rendue difficile par le nombre élevé de facteurs, et par suite d'élasticités indépendantes que l'on doit considérer et donc estimer. L'hypothèse de rendements d'échelle constants et de séparabilité entre facteurs retenue pour GEMINI-E3 permet d'en réduire de façon importante le nombre. Ce qui apparaît essentiel est de prendre en compte les canaux par lesquels agissent les prix, à travers les élasticités prix directes et croisées, et les relations de complémentarité et/ou substituabilité entre facteurs de production. Ceci est obtenu via une structure de fonction CES emboîtée.

La demande des ménages est dérivée du modèle de dépense linéaire dite Stone-Geary, découlant d'une fonction d'utilité, ce qui permet d'exprimer de manière rigoureuse le gain ou la perte économique sous forme de surplus des consommateurs. La demande de travail ainsi que le comportement d'épargne sont en revanche supposés inélastiques.

La mesure de la perte économique soulève un problème qui est lié aux effets de report entre les périodes. La modification du prix relatif de la consommation et de l'investissement provoque une variation du coût d'usage du capital productif et par suite du partage investissement-consommation (et donc du rythme d'accumulation du capital). La mesure du surplus des consommateurs incorpore donc cet effet, qui ne traduit pas véritablement un gain ou une perte économique nette pour l'année considérée mais un report sur les périodes futures (positif si l'investissement augmente, négatif si l'investissement diminue). La mesure qui serait alors pertinente est la somme actualisée des surplus, peu sensible à la variation du rythme d'accumulation du capital (si le taux d'actualisation reflète bien le coût d'opportunité du capital). Mais ceci ne serait vrai que sur un horizon suffisamment long, très supérieur à la période totale prise en considération. La solution technique retenue a été d'imposer la constance du volume d'investissement global de chaque année (mais évidemment pas de la répartition par branche) au moyen d'un ajustement adéquat du taux d'épargne des ménages. Ceci ne signifie pas qu'une variation de l'investissement est jugée

non pertinente, et dans certaines applications on n'impose pas cette contrainte : c'est simplement un artifice pour obtenir une mesure rigoureuse de la perte économique annuelle.

Le modèle calcule les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion d'énergie fossile et les émissions des autres GES compris dans le « panier Kyoto » (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, gaz fluorés) : au total 110 sources d'émission de GES sont décrites par pays. La réduction des émissions de GES peut être obtenue à l'aide de différents instruments : taxe, quotas, permis négociables, et plus généralement les instruments de flexibilité prévus par le Protocole de Kyoto.

Une des plus importantes spécificités du modèle GEMINI-E3 est de prendre en compte les échanges commerciaux avec l'Union européenne et le reste du monde.

### Les limites du modèle GEMINI-E3

Le premier type de limites du modèle GEMINI-E3 tient à sa nature de modèle d'équilibre général calculable. Les hypothèses de l'équilibre général walraso-parétien sont bien connues. Elles correspondent rarement à l'économie réelle.

Comme tous les modèles de ce type, GEMINI-E3 suppose une représentation fiable des facteurs de production et des biens et services échangés, ainsi que de l'offre et de la demande. Il suppose aussi que les mécanismes de la formation des prix répondent à la seule confrontation de l'offre et de la demande sur les marchés. Le modèle suppose aussi que les prix s'ajustent de façon à réaliser l'équilibre. Cette hypothèse est sans doute la plus éloignée de la réalité.

### Annexe 3 : Le modèle hybride IMACLIM

IMACLIM-R (*Impact Assessment of CLIMate policies* - IMACLIM dans ce qui suit) est un modèle multisectoriel développé par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) qui inclut 5 secteurs énergétiques (charbon, gaz, pétrole brut, produits raffinés, électricité), 3 secteurs mobilité (transports routiers, transport aérien, et autres transports), construction, agriculture et industries agroalimentaires, industries intensives en énergie et autres industries et services. Il comprend 12 régions dont le Brésil et l'Inde. IMACLIM est un modèle de croissance dynamique récursif.

Face aux limites des modèles d'équilibre inter-temporels, qui décrivent une trajectoire économique stabilisée, avec une allocation optimale des investissements, l'ambition du modèle IMACLIM est de représenter à la fois le moteur de la croissance à long terme et les frictions pouvant survenir à court terme (anticipations imparfaites, utilisation incomplète des facteurs de production, inerties à différents niveaux – équipements, techniques, préférences, flux commerciaux ou flux de capitaux) au travers d'une architecture récursive.

La croissance économique est ainsi décrite comme une succession d'équilibres statiques : chaque équilibre statique est un cliché de l'économie à une date ou sur période donnée ; la dynamique de l'économie est représentée à travers l'évolution des variables sur une succession d'équilibres. Plus précisément, l'architecture du modèle est conçue sur deux principes :

- chaque équilibre statique représente un bilan économique annuel (production, consommation, échanges internationaux) à travers un équilibre walrasien défini par des équations de comportements de tous les agents, c'est-à-dire les ménages, les entreprises, les états et représentant les flux régionaux et internationaux de biens en quantité et en valeur, ainsi que les flux internationaux d'investissements;
- entre deux équilibres statiques successifs, des modules dynamiques représentent l'évolution des techniques et des stocks de facteurs de production (capital, travail, ressources naturelles), alimentant ainsi une croissance progressive entre chaque équilibre statique.

Chaque équilibre statique ne décrit pas l'optimum collectif de production compte tenu des techniques disponibles. Au contraire, l'équilibre est contraint à une situation sous-optimale caractérisée par exemple, par du chômage structurel, et des surcapacités ou pénuries de production.

Il est important de noter que les équations de comportement incluent des contraintes : capital installé, technologies (coefficients input-output), équipements des ménages, infrastructures publiques. Ça signifie qu'il n'y a pas de substitution de facteur à une année donnée. Certains marchés peuvent ne pas être équilibrés dans un tel processus, permettant ainsi du chômage, de l'excès ou du déficit de capacité de production, des taux de rentabilité inégaux selon les secteurs et les régions.

Les valeurs économiques dérivées de l'équilibre à  $t$  (prix relatifs, niveau de production, taux de rentabilité, allocation des investissements selon les secteurs) informent à la fois :

- le moteur de la croissance macroéconomique, composé de (i) des trends démographiques dérivés des estimations de l'ONU et corrigés des flux migratoires permettant de stabiliser la population dans les régions à faible taux de fertilité; (ii) la productivité du travail gouvernée par des trends exogènes ou endogènes de productivité globales (selon les version du modèle) et par les mécanismes de dépréciations du capital; (iii) dynamique des capacités de production selon une loi habituelle d'accumulation du capital, comprenant une description complète des classes d'âge et des durée de vie spécifiques dans les secteurs.

- des variables de sous-modèles (concernant les systèmes énergétiques, les infrastructures de transport ou les équipements finaux) qui sont des formes réduites de modèles plus détaillés. Les paramètres de comportement des consommateurs et des producteurs qui sont fixés à chaque équilibre statique sont ici susceptibles d'être modifiés. Les sous-modèles dynamiques décrivent la manière dont les agents vont s'adapter, du côté de la demande ou de l'offre, en réponse aux signaux économiques passés (variables découlant du précédent équilibre statique telles que les prix relatifs ou les flux d'investissements). Les évolutions démographiques suivent une trajectoire exogène. Les paramètres structurels de l'équilibre statique (structure de la demande, coefficients *input-output* et statut des technologies, capacités installées, infrastructures) sont alors mises à jour pour le pas de temps suivant.

Le modèle calcule alors l'équilibre suivant sur la base de ces nouveaux coefficients. La trajectoire de croissance de long terme résulte de la manière selon laquelle l'économie s'ajuste aux changements successifs de niveaux d'équipements et de frontière technique. Au-delà des avantages en terme de calcul, cette structure récursive reste une représentation schématique utile du processus de croissance, fait à la fois de variations économiques de court terme (à l'intérieur de l'équilibre statique) et d'évolution de long terme des moteurs de la croissance (dans les modules dynamiques).

## Annexe 4 : Le modèle hybride d'optimisation RICE

### 1. Description du modèle

Le modèle RICE (*Regional Integrated model of Climate and the Economy*) est un modèle hybride d'optimisation qui a été développé par William D. Nordhaus and Joseph Boyer.

Ce modèle définit le monde en régions souveraines, représentées par des grands pays (comme les États-Unis ou la Chine) ou des grandes régions (comme OCDE Europe ou les pays à bas revenus). Chaque région est supposée avoir un ensemble bien défini de préférences sur la consommation courante et future, décrit par une fonction de bien être social régional et un taux de préférence pure pour le présent. Les régions sont supposées maximiser la fonction de bien être social sous un certain nombre de contraintes économiques et géophysiques. La société peut sélectionner différents résultats alternatifs en choisissant différents taux d'épargne et niveaux d'émissions de GES.

Le modèle contient à la fois un secteur traditionnel économique, similaire à celui trouvé dans la plupart des modèles économiques, et un module géophysique conçu pour la modélisation des changements climatiques.

Dans le secteur économique, chaque région est supposée produire un bien unique qui peut être utilisé soit pour la consommation, soit pour l'investissement. Les régions ne sont pas autorisées à échanger, à l'exception de droits d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Chaque région est pourvue d'un stock initial de capital et de travail, ainsi que d'un niveau de technologie propre à chaque région. La croissance démographique et le progrès technique sont supposés exogènes, alors que l'accumulation du capital est déterminée par l'optimisation par chaque région du flux de consommation au cours du temps.

RICE définit un nouvel input dans la production appelé « énergie carbone ». L'« énergie carbone » représente les services de l'énergie dérivés de la consommation de combustibles carbone, ces derniers étant mesurés en unité carbone. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont donc un produit joint de l'utilisation de l'énergie à des fins productives. L'économie peut donc réduire ses émissions en substituant du capital et/ou du travail à l'input « énergie carbone ».

Le progrès technique prend deux formes : un progrès technique à l'échelle de l'économie globale, et un progrès technique économe en carbone. Plus précisément, le premier est neutre au sens de Hicks, alors que le second est supposé accroître le ratio des services de l'énergie sur les émissions de CO<sub>2</sub>.

Les éléments de la fonction de production relatifs à l'énergie sont calibrés en utilisant les données sur les émissions de carbone, l'utilisation de l'énergie, les prix des énergies et les élasticités-prix des énergies. Cela permet de calculer une fonction empirique des coûts d'abattement en carbone, alors que la plupart des modèles d'évaluation intégrée font des hypothèses raisonnables sur les coûts, mais non basées sur ce que l'on peut observer empiriquement.

Dans RICE, une courbe d'offre de carbone est introduite, ce qui signifie que les coûts de production de l'énergie carbone augmentent quand l'extraction cumulée s'élève. Parce que le modèle est basé sur un cadre d'analyse de croissance endogène, les combustibles fossiles sont alloués efficacement, ce qui implique que les ressources à bas prix présentent une rente de rareté (rente d'Hotelling) qui croît avec le temps.

La composante environnementale du modèle contient un certain nombre de relations géophysiques qui relient les différents facteurs affectant les changements climatiques. Cette partie inclut un cycle du carbone, une équation de puissance de radiation, des équations de changements climatiques, et une relation entre changements climatiques et dommages. Les secteurs géophysiques sont des représentations simplifiées de modèles beaucoup plus complexes mais fournissent des résultats très proches de ceux obtenus par des modèles plus élaborés.

## 2. Limites du modèle

La fonction de dommage, en particulier la réaction des pays en développement et des écosystèmes aux changements climatiques, n'est pas pleinement comprise. Un point important qui reste ouvert pour l'instant est la possibilité d'un changement climatique soudain. C'est un scénario qui ne doit pas être écarté, même si des mécanismes et des probabilités précis n'ont pas été déterminés.

Le modèle ne tient pas compte des questions d'incertitude, pour lesquelles l'aversion au risque et les possibilités d'apprentissage peuvent modifier la rigueur et le calendrier des stratégies de contrôle.

De plus, les calculs omettent les interactions entre le changement climatique et certaines imperfections du marché, comme la pollution de l'air, les taxes, la R&D, qui peuvent renforcer ou affaiblir la logique derrière les réductions de GES ou les taxes carbone.

Bien que le modèle suppose un progrès technique substantiel dans le futur, il omet le progrès technique endogène.

Enfin, le modèle suppose que les politiques sont mises en place de manière efficiente, ce qui est sans doute une hypothèse optimiste, étant donnés les défauts de la plupart des politiques environnementales.

## Annexe 5 : Comparaison des différents types de modèles en fonction de certaines variables clés

Cette annexe propose une description détaillée de quelques modèles cités dans la note. Une case vide signifie que l'information n'est pas renseignée dans la documentation décrivant le modèle en question.

|                                                      | MODELES MACROECONOMETRIQUES                                                                   |                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables                                            | Oxford GMM                                                                                    | MESANGE                                                                                                                   |
| Répartition géographique                             | 45 pays                                                                                       | France uniquement                                                                                                         |
| Secteurs                                             | 1 seul secteur                                                                                | Trois secteurs : l'industrie manufacturière, le secteur marchand non manufacturier et le secteur des services administrés |
| Horizon de projection                                | Moyen à long terme                                                                            | Court à moyen terme                                                                                                       |
| Progrès technique                                    |                                                                                               | Exogène                                                                                                                   |
| Fonction de production                               | Fonction de production à facteurs substituables et à rendements décroissants                  | Fonction de production à facteurs substituables, à rendements constants et à élasticité de substitution constante (CES)   |
| Principaux facteurs de production                    | Capital et travail                                                                            | Capital et travail                                                                                                        |
| Échanges internationaux de permis de CO <sub>2</sub> | Les importations et exportations portent uniquement sur les biens autres que les combustibles | L'environnement international est supposé exogène                                                                         |
| Mesure du bien-être                                  |                                                                                               |                                                                                                                           |
| Externalités environnementales                       |                                                                                               |                                                                                                                           |

|                                   | MODELES D'EQUILIBRE GENERAL                                                                                                                                        |                                                              |                                                                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables                         | EPPA                                                                                                                                                               | GEM-E3                                                       | GEMINI-E3                                                                            |
| Répartition géographique          | Régions multiples                                                                                                                                                  | 21 régions                                                   | France, autres pays européen, reste du monde                                         |
| Secteurs                          | Secteurs multiples                                                                                                                                                 | 18 secteurs                                                  | 18 secteurs                                                                          |
| Horizon de projection             | Très long terme (100 ans)                                                                                                                                          | Long terme (35 ans)                                          | Long terme (30 ans)                                                                  |
| Progrès technique                 | Exogène                                                                                                                                                            | Partiellement endogène                                       | Endogène                                                                             |
| Fonction de production            | Fonctions de production CES emboîtées                                                                                                                              | Fonctions de production CES emboîtées                        | Fonctions de production CES emboîtées                                                |
| Principaux facteurs de production | Capital, travail, terre et énergie                                                                                                                                 | Capital et travail                                           | Capital, travail et énergie                                                          |
| Échanges internationaux           | Échanges internationaux entre tous biens et tous pays, avec hypothèse d'Armington <sup>33</sup> pour tous les biens sauf le pétrole brut et les droits d'émission. | Échanges bilatéraux endogènes                                | Échanges internationaux entre l'UE et le reste du monde, avec hypothèse d'Armington. |
| Mesure du bien-être               | Variation équivalente de l'utilité ( <i>i.e.</i> surplus du consommateur), mesurée par la variation dans la consommation agrégée.                                  | Variation équivalente du bien-être                           | Variation équivalente de l'utilité ( <i>i.e.</i> surplus du consommateur)            |
| Externalités environnementales    | GES et autres pollutions de l'air                                                                                                                                  | GES, autres pollutions de l'air et dommages environnementaux | GES                                                                                  |

<sup>33</sup> Hypothèse selon laquelle un même type de bien produit dans des pays différents ne présente pas les mêmes caractéristiques. Différentes versions d'un même type de bien sont donc des substituts imparfaits.

|                                   | MODELES HYBRIDES                                                                     |                               |                                                                                                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variables                         | MERGE                                                                                | E3MG                          | IMACLIM-R                                                                                                            |
| Répartition géographique          | Régions multiples                                                                    | 20 régions                    | 12 régions                                                                                                           |
| Secteurs                          | 2 secteurs                                                                           | Secteurs multiples            | 12 secteurs                                                                                                          |
| Horizon de projection             | Très long terme (150 ans)                                                            | Très long terme (100 ans)     | Très long terme (100 ans)                                                                                            |
| Progrès technique                 | Endogène                                                                             | Partiellement endogène        | Endogène                                                                                                             |
| Fonction de production            | Fonctions de production CES emboîtées                                                | Fonctions de production CES   | Reconstitution <i>bottom up</i> de la fonction de production                                                         |
| Principaux facteurs de production | Capital, travail et énergie                                                          | Capital et travail            | Capital et travail                                                                                                   |
| Échanges internationaux           | Échanges internationaux d'un nombre limité de biens, notamment les permis d'émission | Échanges bilatéraux endogènes | Les équilibres budgétaire et commercial se compensent l'un l'autre via la variation des prix des différentes régions |
| Mesure du bien-être               | Consentement à payer pour éviter le changement climatique                            |                               | % de perte de la consommation actualisée et agrégée des ménages                                                      |
| Externalités environnementales    | Dommages non marchands sur la santé et l'environnement                               |                               | Externalités de connaissance et technologiques                                                                       |