



CEPII

**CENTRE
D'ÉTUDES PROSPECTIVES
ET D'INFORMATIONS
INTERNATIONALES**

N° 2009 – 36
Décembre

DOCUMENT DE TRAVAIL

Les impacts économiques du changement climatique : enjeux de modélisation

Pierre Besson & Nina Kousnetzoff

TABLE DES MATIÈRES

Non-technical summary	3
Abstract	4
Résumé non technique	5
Résumé court.....	6
1. Introduction.....	7
2. Une grille d'analyse pour différencier les modèles	9
2.1. La représentation du progrès technique : l'axe Bottom Up/Top Down.....	9
2.2. Les éléments de dynamique des modèles	13
2.3. Coupler les modèles préexistants : les tentatives d'hybridation.....	18
3. Un exemple d'application des modèles : déterminer la valeur économique de la tonne de CO2.....	26
3.1. L'intérêt d'une valeur économique de la tonne de carbone.....	27
3.2. L'importance d'une définition cohérente du scénario de référence et des scénarii de contraintes	30
3.3. Les principaux résultats des simulations et leur lien avec les structures des modèles ...	36
4. Les limites de l'approche coût-efficacité et les champs de réflexion possibles	42
4.1. La nécessité de lier les coûts des politiques à l'évitement des dommages créés par le changement climatique	43
4.2. La complexité des liens entre croissance économique et environnement	51
Conclusion.....	56
Bibliographie.....	59
Liste des documents de travail du CEPII	63

MODELING THE ECONOMIC IMPACTS OF CLIMATE CHANGE: WHAT IS AT STAKE?

NON-TECHNICAL SUMMARY

The work of the International Panel on Climate Change (IPCC) since 1988 has confirmed the fact of anthropogenic climate change, and the urgency of substantially reducing greenhouse-gas emissions. But the slow pace of international climate negotiations point at the difficulty of selecting appropriate actions and establishing a priority order. This is partly due to the large differences between various assessments of the economic impacts of climate change and of the cost of mitigation policies. These assessments cannot avoid a number of questionable assumptions in energy-economic modeling which impact the results, originating in a value system one should be aware of.

Most of the models merely operate in a “cost-effective” mode to compare climate change mitigation policies. This approach consists in defining an a priori GES emissions reduction target which would allow attaining a GES atmospheric concentration target at a certain time horizon. Then the role of models is to estimate the economic impacts of policies needed to reach these objectives, in order to help decision-makers to choose the most efficient policy, that is to say the least costly. In this paper, we review the existing models, taking as examples the main four models used in France: ENV-LINKAGES (OECD), IMACLIM-R (CIRED), GEMINI-E3 (C-ORDEE and MEEDAD) and POLES (LEPII).

The models are analyzed according to two factors: representation of technical progress and dynamics. As concerns technical progress, Bottom-Up models describe in detail the energy technologies, but do not model satisfactorily the feedback effects on the rest of the economy; whereas Top-Down models assess the impacts of mitigation policies on GDP and welfare, but do not catch satisfactorily technical progress potentials. As concerns projections, a recursive dynamic framework is used in most of the models, which does not allow to represent expectations satisfactorily; with this type of framework, one can build only exploratory scenarios. The intertemporal optimization models, which include agents’ expectations in normative scenarios, necessitate many calculations, if regions, sectors and technologies are represented in detail. Hybridization between models of different families attempts to compensate these shortcomings.

The work of the Quinet Committee on “State-imposed Value of Carbon” is then used to analyze the consequences of theoretical differences between models on a practical case: the assessment of the economic value of carbon by GEMINI-E3, IMACLIM-R and POLES. According to IMACLIM-R, a hybrid model, the abatement cost stabilizes in the long term, due to induced technical progress; the cost continues to grow according to the Top-Down GEMINI-E3 model, due to the constant elasticities of substitution in the production function,

and according to the Bottom-Up POLES model, due to a supply constraint in no-carbon energy supplies.

The analysis of energy-environmental models is continued with the Stern Review and its critics. New sources of uncertainty appear when a “cost-benefit” mode is used: incomplete knowledge of future damages, the choice of a rate of discount to compare early policies and their effects, and finally alternative methods of estimating non-market damages. The “cost-benefit” mode reveals the complexity of the links between the economy and the environment. Exogenous extrapolations of income growth and technical progress, induced by the use of traditional growth indicators which do not take into account changes in the environment, could delay the launch of environmental policies indefinitely.

ABSTRACT

Large differences remain between various assessments of the economic impacts of climate change and of the cost of mitigation policies. These are partly due to a number of questionable assumptions in energy-economic modeling, originating in a value system one should be aware of. This study sets up a frame of reference to analyze the impact of modeling choices on the results.

Energy-economic models are analyzed, with four examples: ENV-Linkages, GEMINI-E3, IMACLIM-R and POLES. Top-Down models do not catch enough technical progress potentials, whereas Bottom-Up models do not model satisfactorily the feedback effects of the energy sector on the rest of the economy. Recursive dynamic models do not take enough into account the agents’ expectations and cannot build normative scenarios. On the contrary, some hybrid models and all the intertemporal optimization models include an endogenization mechanism which confuses the results. We then analyze the consequences of theoretical differences between models on a practical case: the assessment of the economic value of carbone by GEMINI-E3, IMACLIM-R and POLES

The Stern Review is analyzed in the broader framework of economic growth-environment modelization. The differences in results with other “cost-benefit” models are due to incomplete knowledge of future damages, the choice of an actualization rate and the assessment of non-market damages.

JEL Classification: Q54, Q32, Q43

Key Words: Energy-economic models; climate change mitigation ; cost-benefit analysis.

LES IMPACTS ÉCONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : ENJEUX DE MODÉLISATION

RÉSUMÉ NON TECHNIQUE

Les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) menés depuis 1988 ont permis d'attester la réalité d'un changement climatique mondial dû aux activités humaines et de l'urgence d'efforts pour réduire substantiellement les émissions de gaz à effet de serre. Le choix des actions à engager ainsi que leur calendrier restent cependant difficiles comme le prouve la lenteur des négociations internationales sur le climat. Cela s'explique en partie par les divergences considérables qui subsistent sur l'évaluation comparée des coûts des dommages du changement climatique et des politiques d'atténuation. Cette évaluation ne peut faire l'économie d'un certain nombre d'hypothèses de modélisation aussi structurantes que discutables, qui reposent sur un système de valeurs dont il faut avoir conscience pour analyser les résultats des modèles économiques avec effets environnementaux.

La plupart des modèles se contentent d'une analyse « coût-efficacité » des politiques d'atténuation du changement climatique. Cette approche consiste à définir ex-ante une cible de réduction des émissions de gaz à effet de serre qui permettrait d'atteindre un objectif de concentration atmosphérique de ces gaz à un horizon donné. Le rôle des modèles est alors de simuler les impacts économiques des politiques nécessaires pour atteindre ces objectifs afin de permettre aux décideurs politiques de choisir la plus efficace, à savoir la moins coûteuse. Nous menons ici une revue critique des modèles existants en nous appuyant sur l'analyse des quatre principaux modèles existant en France : ENV-Linkages (OCDE), IMACLIM-R (CIRED), GEMINI-E3 (C-ORDEE et MEDAD) et POLES (LEPII).

Les modèles ont été analysés selon deux critères : la représentation du progrès technique et les éléments de dynamique. En ce qui concerne le progrès technique, les modèles Bottom-Up permettent de décrire précisément les technologies du secteur énergétique et de simuler des trajectoires possibles du progrès technique, mais ces modèles reproduisent mal les effets en retour sur le reste de l'économie ; à l'inverse, les modèles Top-Down évaluent les impacts des politiques d'atténuation sur le PIB et le bien-être, mais prennent mal en compte les potentiels de progrès technique. En ce qui concerne les projections, la plupart des modèles fonctionnent en dynamique récursive, ce qui ne permet pas de prendre en compte de façon satisfaisante les anticipations des agents ; cette dynamique amène à se cantonner à des scénarios exploratoires. Les modèles à optimisation inter-temporelle, qui intègrent les anticipations dans des scénarios normatifs, impliquent un nombre de calculs très élevé dès que l'on veut représenter finement les régions, les secteurs et les technologies. L'hybridation entre modèles des différentes familles tente de compenser les lacunes des uns et des autres.

Notre étude s'appuie ensuite sur les travaux de la Commission Quinet sur « La valeur tutélaire du carbone », pour étudier sur un exemple – la détermination de la valeur économique du carbone par les modèles GEMINI-E3, IMACLIM-R et POLES – comment les divergences théoriques des modèles se traduisent dans la pratique. Dans le modèle hybride IMACLIM-R,

le coût d'abattement se stabilise à long terme grâce à la représentation du progrès technique induit, alors qu'il continue à croître dans le modèle Top-Down GEMINI-E3 (dont la fonction de production comporte des élasticités de substitution constantes) et dans le modèle Bottom-Up POLES (où apparaît une contrainte d'offre sur les énergies non carbonées).

La revue des modèles est complétée par l'analyse du Rapport Stern et de ses critiques. On constate que de nouvelles difficultés apparaissent avec l'utilisation d'une approche « coûts-bénéfices » : la connaissance des risques de dommages est incomplète, le choix d'un taux d'actualisation pour valoriser le décalage temporel entre les politiques préventives et leurs effets devient nécessaire, et enfin l'estimation des impacts du changement climatique hors domaine marchand fait appel à des méthodes « alternatives ». L'approche coûts-bénéfices révèle la complexité des liens entre croissance économique et environnement. L'extrapolation exogène de la croissance du revenu et du progrès technique, encouragée par l'utilisation des indicateurs traditionnels de croissance qui négligent les modifications de l'environnement, risque de retarder indéfiniment la mise en œuvre de politiques environnementales.

RÉSUMÉ COURT

Des divergences considérables subsistent dans l'évaluation des coûts des dommages du changement climatique et des politiques d'atténuation. Elles sont dues en partie aux hypothèses et aux choix structurels des modèles économiques avec effets environnementaux. Cette étude établit une grille d'analyse pour révéler l'impact des choix de modélisation sur les résultats.

Les modèles sont analysés en prenant comme exemples ENV-Linkages, GEMINI-E3, IMACLIM-R et POLES. Les modèles Top-Down prennent insuffisamment en compte les potentiels de progrès technique dans le secteur énergétique, alors que les modèles Bottom-Up reproduisent mal les effets en retour du secteur énergétique sur l'ensemble de l'économie. Les modèles à dynamique récursive représentent insuffisamment les anticipations des agents et ne peuvent produire de scénarios normatifs. A l'opposé, certains modèles hybrides et tous les modèles d'optimisation inter-temporelle ont des mécanismes d'endogénéisation qui rendent difficile l'interprétation des résultats. Nous étudions ensuite sur un exemple – la détermination de la valeur économique du carbone par les modèles GEMINI-E3, IMACLIM-R et POLES – comment les divergences théoriques des modèles se traduisent dans la pratique.

La revue est complétée par l'analyse du Rapport Stern, replacé dans le cadre plus large de la modélisation des liens entre croissance économique et environnement. Les divergences des résultats avec d'autres modèles « coûts-bénéfices » proviennent de la connaissance incomplète des risques de dommages, du choix des taux d'actualisation et enfin de l'évaluation des dommages hors domaine marchand.

Classification JEL : Q54, Q32, Q43

Mots-clefs : Modèles énergie-économie ; atténuation du changement climatique ; analyse coût-bénéfice.

LES IMPACTS ÉCONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : ENJEUX DE MODÉLISATION

Pierre Besson & Nina Kousnetzoff*

1. INTRODUCTION

Des divergences considérables subsistent sur l'évaluation comparée des coûts des dommages du changement climatique et des politiques d'atténuation. Ainsi William Nordhaus, membre de l'Académie des sciences américaine, estime qu'il serait optimal de laisser ces émissions être multipliées par trois au cours du siècle à venir. Au contraire, en utilisant la même approche comparative dans son rapport sur l'économie du changement climatique¹, Nicholas Stern, membre de l'Académie des sciences britanniques, estime de son côté que si les émissions de GES ne sont pas stabilisées à l'horizon 2020, puis ne décroissent pas de 2,5% par an jusqu'en 2050, alors les pertes dues au changement climatique seront comprises entre 5 et 20% du Produit Mondial Brut (PMB).

Cette mise en parallèle rappelle que l'évaluation des dommages climatiques et des politiques environnementales ne peut faire l'économie d'un certain nombre d'hypothèses de modélisation aussi structurantes que discutables. A l'incertitude traditionnelle liée à la prospective économique vient s'ajouter l'incertitude quant à l'évolution du climat et aux impacts potentiels sur les structures de nos économies. Cette double difficulté contraint les économistes à faire certains choix qui reposent sur un système de valeurs dont il faut avoir conscience pour analyser les résultats de leurs modèles.

Si l'incertitude demeure sur certains points, les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) depuis 1988 ont permis d'attester la réalité d'un changement climatique mondial dû aux activités humaines et de l'urgence d'efforts pour réduire substantiellement nos émissions de GES. Le choix des actions à engager ainsi que les priorités de calendrier restent cependant complexes à définir comme le prouve la lenteur des négociations internationales sur le climat. Si l'Union Européenne s'est engagée en mars 2007 à réduire unilatéralement de 20% ses émissions en 2020 par rapport à 1990 et de 60% en 2050, des pays clés demeuraient en retrait jusqu'au sommet de Copenhague : États-Unis, grands pays émergents.

En simulant les politiques environnementales optimales pour atteindre ces objectifs, de nombreux modèles permettent d'aider à la prise de décisions publiques. Une liste exhaustive et non critique de ces modèles environnementaux nous laisserait dépourvus pour comprendre la dispersion des résultats issus de ces travaux. Le parti pris de cette étude a été d'analyser

* Pierre Besson, Master Analyse des Politiques Economiques, École d'Économie de Paris, stagiaire au CEPII.
Nina Kousnetzoff, économiste senior, CEPII.

¹ Stern (2006).

comment les hypothèses, les choix dans les structures des modèles peuvent expliquer cette variété. La compréhension de ces choix permettra d'établir une revue critique des modèles existants, de les classer en grandes familles et d'indiquer de nouvelles pistes de recherches.

La présente étude a été préparée par l'organisation en 2008 au CEPII de séminaires techniques au cours desquels quatre équipes de chercheurs ont présenté leur modèle : ENV-Linkages² (OCDE), IMACLIM-R³ (CIRED), GEMINI-E3⁴ (C-ORDEE et MEDAD) et POLES⁵ (LEPII).

Ces quatre modèles sont les principaux existants en France et possèdent des architectures suffisamment différenciées pour permettre, à partir de leur étude, de mettre en évidence les grands axes d'analyse qui structurent la modélisation du changement climatique au niveau mondial, comme nous le verrons dans la deuxième partie.

Notre étude s'appuie aussi sur le travail effectué par la Commission Alain Quinet du Conseil d'Analyse Stratégique sur « La valeur tutélaire du carbone »⁶. La valorisation monétaire des externalités négatives de la production par l'intermédiaire d'un prix donné à la tonne de carbone est un élément crucial de toute politique environnementale. Pour nourrir sa réflexion, la Commission Quinet avait demandé à trois des modèles examinés au CEPII de simuler des trajectoires de valeur carbone. Cet exercice constitue pour nous une opportunité intéressante d'étudier comment les divergences théoriques des modèles se traduisent dans la pratique : c'est ce qui a été fait dans la troisième partie.

Cependant, les quatre modèles en question, en détaillant les politiques optimales pour atteindre un objectif de réduction des émissions donnée (approche coût-efficacité), ne présentent la régulation environnementale que sous l'angle négatif des coûts. Ces coûts doivent être comparés aux bénéfiques liés à l'évitement des dommages du changement climatique pour permettre aux décideurs politiques d'effectuer des arbitrages (approche coût-bénéfice). Les discussions qui ont suivi la parution du rapport Stern montrent que le chiffrage de ces dommages et la prise en compte des capacités d'adaptation structurelle de nos économies sont loin d'être exempts des choix subjectifs évoqués ci-dessus. L'économie du changement climatique, comme tous les exercices de prospective, demeure un champ d'affrontements éthiques qu'à défaut de résoudre, nous allons tenter de mettre en évidence dans la quatrième partie.

² OCDE (2008)

³ Crassous (2006)

⁴ Bernard, Drouet & Vielle (2008)

⁵ LEPII (2006)

⁶ Centre d'analyse stratégique (2009)

2. UNE GRILLE D'ANALYSE POUR DIFFÉRENCIER LES MODÈLES

Nous avons choisi deux grands axes de différenciation entre modèles : le traitement du rôle du progrès technique et les enjeux liés à la définition des éléments dynamiques du modèle. Cette grille d'analyse permet de couvrir deux enjeux primordiaux pour les politiques de réduction des émissions de GES. Ces politiques visent à engager l'économie sur un sentier de production plus économe en émissions. Les possibilités de substitution de techniques et de sources d'énergie moins intensives en carbone seront donc essentielles pour évaluer ces mesures. En outre, la réussite de ces politiques dépendra des priorités fixées et du calendrier d'application, d'où l'intérêt de se concentrer sur les éléments dynamiques. Mais avant de commencer, il paraît important de préciser que tous ces modèles privilégient une approche coût-efficacité.

Cette approche consiste à définir ex-ante un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) qui permettrait d'atteindre un objectif de concentration atmosphérique de ces gaz à un horizon donné. Ces cibles peuvent être issues des travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ou fixés par des engagements politiques antérieurs (Protocole de Kyoto, directive européenne ou nationale). Elles sont exprimées en parties par million⁷ (450 ppm, 550 ppm) lorsqu'il s'agit de concentration ou en gigatonnes de carbone ou équivalent carbone lorsqu'il s'agit d'émissions. Le rôle des modèles est alors de simuler les impacts économiques des politiques nécessaires pour atteindre ces objectifs et de permettre aux décideurs politiques de choisir la plus efficace, à savoir la moins coûteuse. Nous reviendrons sur les limites de cette approche et sur une autre approche en termes de coûts-bénéfices dans la troisième partie.

2.1. La représentation du progrès technique : l'axe Bottom Up/Top Down

Le but de toute politique liée au changement climatique est de faire évoluer le système énergétique vers des sentiers technologiques moins producteurs de GES. La prise en compte de l'émergence de nouvelles technologies et des possibilités de substitution entre énergies est donc cruciale pour analyser ces trajectoires. Deux grandes familles de modèles ont proposé des approches radicalement différentes : les modèles Bottom-Up (ou modèles technico-économiques) et les modèles Top-Down (ou modèles macro-économiques).

Les améliorations apportées aux modèles des deux catégories ces dernières années et notamment les tentatives d'hybridation décrites ci-après rendent la distinction Bottom-Up/Top-Down quelque peu caricaturale. Mais cet axe d'analyse permet néanmoins de saisir les choix stratégiques de chaque équipe de modélisateurs quant à la structure de leur modèle.

⁷ Ratio entre le nombre de molécules de GES et le nombre total de molécules d'air sec.

Les modèles Bottom-Up : développés originellement par des ingénieurs, ils s'appuient sur une description précise du secteur énergétique tant du côté de l'offre – techniques disponibles, choix d'investissement, stocks d'énergie- que de la demande - efficacité de la consommation finale d'énergie et possibilités de substitutions entre énergies effectuées par le consommateur.

Ils proposent un grand détail de technologies existantes et de potentiels techniques à venir (40 technologies énergétiques dans POLES⁸ du LEPII). Les substitutions entre sources d'énergie et entre techniques sont calibrées grâce à des études économétriques ou à la littérature propres au secteur de l'énergie. Ces possibilités de substitutions sont évolutives dans le temps pour saisir l'impact du progrès technique et de potentielles ruptures technologiques sur le secteur énergétique. Le progrès technique est également induit par la demande des ménages en fonction du prix et de l'efficacité de chaque énergie. Cette présentation se fait en termes physiques ce qui permet de tenir compte du caractère limité de certaines ressources énergétiques.

Ils se présentent le plus souvent en équilibre partiel et n'incorporent qu'une représentation globale et exogène du reste de l'économie, sous la forme d'une trajectoire des grands agrégats macro-économiques choisie par le modélisateur.

Les atouts des modèles Bottom-Up sont multiples. Ils permettent une compréhension fine des combinaisons techniques d'inputs et d'outputs énergétiques et leurs impacts en termes d'émission. Ils permettent de prendre en compte des trajectoires techniques radicalement différentes via les choix d'investissement, les gains d'efficacité et la direction endogène du progrès technique. Leurs résultats étant exprimés en unités physiques, ils sont plus facilement compatibles avec des modules environnementaux qui révèlent les impacts des émissions de GES sur le climat.

Mais les modèles Bottom-Up souffrent également de plusieurs faiblesses. Les politiques énergétiques n'agissent pas seulement sur l'ajustement du secteur de l'énergie mais produisent également des effets externes forts sur le reste de l'économie. S'appuyer sur un modèle en équilibre partiel revient à considérer que ces externalités sont négligeables. Ainsi, on ne tiendrait pas compte des effets de l'utilisation des recettes fiscales issues des taxes sur l'énergie (Goulder, 1995), des externalités de ces politiques sur les termes de l'échange internationaux (Böhringer et Rutherford, 2002) ou du progrès technique induit (Otto, 2006). Plus généralement les modèles Bottom-Up sont critiqués pour manquer de réalisme dans la description micro-économique des choix de technologies des producteurs et consommateurs et dans la prise en compte des effets macro-économiques de différents sentiers et politiques énergétiques sur la structure de l'économie, la productivité ou le commerce.

Les modèles Top-Down : ils se caractérisent par une représentation globale de l'économie et une représentation plus agrégée du système énergétique lui-même. Depuis la fin des années 1980, la famille des modèles Top-Down est dominée par les modèles d'équilibre général

⁸ LEPII (2006).

calculable (MEGC) même si d'autres formes subsistent comme nous le détaillerons dans la partie 1.2.

Ils s'appuient en général sur une représentation walrasienne de l'économie. Ils décrivent explicitement les préférences des consommateurs et les possibilités techniques des secteurs à travers des agents représentatifs, avec de nombreuses variantes concernant le mode d'anticipations des agents, les hypothèses d'optimalité des comportements, la désagrégation sectorielle et régionale. Ces modèles fournissent une évaluation du coût macroéconomique des politiques de réduction, sous la forme de variations de PIB ou de coûts en bien-être, une fois pris en compte l'ensemble des effets de système dans l'économie.

Ces modèles s'appuient sur les fondements micro-économiques des décisions des agents, et assurent la cohérence macro-économique propre aux modèles mondiaux et multisectoriels. Dans le champ énergie-climat, leur principal atout est de représenter les interactions intersectorielles et la propagation des effets des politiques de réduction des émissions de GES dans l'ensemble des économies.

Certaines critiques adressées aux modèles Top-Down, comme l'impossibilité de représenter des déséquilibres de marché comme le chômage ou un déséquilibre de la balance des paiements, semblent négliger les améliorations apportées à ces modèles depuis de nombreuses années. Une faiblesse fondamentale demeure pourtant : ces modèles n'ont pas été conçus pour évaluer les possibilités de progrès technique futur. Les substitutions entre sources d'énergie et entre techniques de production sont représentées par des fonctions à élasticités de substitution constantes (CES). Les élasticités constantes sont calibrées à partir de données historiques et n'évoluent pas dans le temps. Il est alors difficile d'imaginer que ces élasticités resteront valides dans un avenir où des politiques environnementales ambitieuses seraient menées.

En outre, si la production et l'utilisation d'énergie peuvent être considérées comme un élément marginal de l'économie à court terme, des changements importants sur l'offre et la demande d'énergie peuvent avoir à long terme des effets importants sur la croissance et la structure économique. La nécessité de faire reposer les projections économiques sur une structure technique crédible est un défi majeur pour les modèles Top-Down.

Ces deux approches de la technologie ont structuré la modélisation des problématiques climatiques. L'émergence du débat Bottom-Up/Top-Down eut lieu pendant la controverse autour de l'efficiency-gap durant les années 80 et 90 (Grubb, 1993). Cet « efficiency-gap » est l'écart entre le système énergétique le plus efficace permis par les techniques disponibles et celui actuellement en place. D'une part, les modélisateurs Top-Down, notamment ceux en équilibre général calculable, travaillaient avec l'hypothèse de marchés en concurrence parfaite qui allouent efficacement les inputs et biens finaux. De l'autre, les modèles Bottom-Up suggéraient qu'il existait des possibilités d'amélioration de l'efficacité du système énergétique sans regret, c'est-à-dire rentables.

Mais le fossé entre les deux catégories de modèles est devenu encore plus prégnant lorsque le débat public s'est concentré sur les nouvelles politiques à mettre en place pour engager l'économie sur un sentier technologique moins émetteur de GES. De nombreux exercices de simulation ont été menés au cours des vingt dernières années pour aider les décideurs politiques à choisir les cibles environnementales à atteindre, les délais à respecter et les mesures optimales pour respecter ces engagements. Comme le notent Hourcade & al. (2006), pour être utile, un modèle énergie/climat doit répondre à trois critères :

- **Être technologiquement explicite**, en incluant notamment une évaluation des impacts des politiques d'aide à la commercialisation et à la diffusion des innovations sur les coûts financiers d'acquisitions de nouvelles technologies.
- **Être réaliste dans la description des comportements micro-économiques** des consommateurs comme des producteurs
- **Être pourvu d'une cohérence macro-économique** qui permette de lier l'offre et la demande d'énergie à l'évolution du reste de l'économie, en incluant notamment les impacts en termes d'échanges commerciaux et financiers entre pays si une politique est menée au niveau régional voire mondial.

Les modèles Bottom-Up conventionnels se fondent sur une utilisation solide du premier critère et souffrent d'un déficit sur les deux derniers. Les modèles Top-Down conventionnels respectent les impératifs de cohérence micro et macro mais échouent à représenter les solutions techniques sans regret à court terme et les ruptures technologiques à long terme car ils sont plus faibles sur le premier critère.

Cette différenciation permet également d'analyser comment les différences de structure de modèles influencent leurs résultats. Comme ils manquent d'une représentation technologique explicite, les modèles Top-Down conventionnels ont tendance à conclure que les potentiels de substitution entre énergies et techniques, fondés sur des élasticités calibrées historiquement, sont limités. Ces modèles obtiennent donc des estimations de coûts élevés pour les politiques de réduction des émissions de GES. En décrivant finement les possibilités techniques mais en négligeant les effets externes de changement technologique sur les décisions des acteurs et sur la structure de l'économie, les modèles Bottom-Up ont tendance à conclure que les efforts pour évoluer vers des sources d'énergie et des techniques plus propres seront relativement peu coûteuses voire profitable (sans regret).

Cette distinction ouvre un champ pour des modèles conciliant les trois critères, d'où les tentatives d'hybridation décrites ci-après. Une comparaison entre les modèles, que nous reprendrons en fin de partie, est présentée dans le tableau 1.

Tableau 1. Comparaison des modèles Bottom-Up et Top-Down

	Bottom-Up	Top-Down
Forces	<p>Description fine des combinaisons d'inputs et d'outputs énergétiques et de leur évolution : progrès technique endogène</p> <p>Résultats exprimés en données physiques donc plus facilement compatibles avec des modules climatiques.</p>	<p>Fondements micro-économiques des décisions des agents.</p> <p>Modèle bouclé permettant de saisir les interactions sectorielles des politiques environnementales.</p>
Faiblesses	<p>Equilibre partiel : néglige les interactions entre système énergétique et reste de l'économie</p> <p>Représentation du reste de l'économie fruste et exogène</p>	<p>Elasticités de substitution constantes peinent à capter les évolutions technologiques futures</p>
Exemples	<p>France : POLES (LEPII) MEDEE-ME (ENERDATA)</p> <p>Monde : TIMER Famille MARKAL MESSAGE</p>	<p>France : ENV-Linkages (successeur de Green à l'OCDE) GEMINI-E3</p> <p>Monde : EPPA (MIT) Worldscan DICE / RICE (Nordhaus)</p>

2.2. Les éléments de dynamique des modèles

La quasi-totalité des modèles coût-efficacité du champ énergie-climat possède une architecture dynamique. L'évaluation d'une politique à horizon 2020, 2050 voire 2100 ne peut faire l'économie de l'analyse des effets dynamiques des structures économiques. La capacité des agents à anticiper les effets d'une politique environnementale pour s'adapter est par exemple un critère essentiel de réussite de ces mesures. La représentation des anticipations, comme celle du progrès technique ou de l'accumulation des facteurs de production, dépendent également fortement des choix du modélisateur.

2.2.1. La modélisation des anticipations : dynamique récursive versus optimisation inter-temporelle

Les améliorations de modélisation théoriques et techniques des années 1990 ont permis de passer de structures en statique comparative à des architectures dynamiques, y compris dans le champ environnemental. Un certain nombre de modèles d'équilibre général calculable (donc Top Down), comme ENV-Linkages ou GEMINI-E3, fonctionnent en dynamique récursive. Les outputs calculés par le modèle pour la période t sont entrés comme inputs pour

la période $t+1$. On commence par calibrer le modèle, c'est-à-dire qu'on lui intègre des trajectoires exogènes pour certaines grandes variables : productivité des facteurs, scénarios de croissance, demande énergétique. Les paramètres du modèle s'ajustent ensuite à ces trajectoires exogènes. Voici un tableau récapitulatif de l'utilisation de ce mécanisme dans la construction du scénario de référence de ENV-Linkages (tableau 2).

Tableau 2. Variables exogènes et endogènes dans le scénario de référence de ENV-Linkages.

Tendances exogènes	Variables d'ajustement endogènes
PIB	Productivité du capital humain
Ratios Commerce International/PIB	Coûts Iceberg
Demande d'énergie	Efficacité énergétique

On peut alors procéder à la simulation, en bloquant les variables d'ajustement et faisant changer les variables exogènes pour simuler l'impact de chocs macroéconomiques dans le modèle. Ce procédé présente une faiblesse dont il faut avoir conscience. Si la productivité du capital humain est fixée et si le PIB varie, on perd toutes les informations liées à l'impact d'un tel choc sur la variable productivité. L'introduction de trajectoires exogènes peut s'avérer problématique si l'on considère les capacités d'un modèle à expliquer les déterminants fondamentaux de l'économie et des émissions de GES. Cependant, il faut souligner que les tentatives actuelles visant à rendre endogènes toutes les variables du modèle concluent à des trajectoires d'émission souvent jugées comme exubérantes (voir McKibbin & al., 1998). La présentation des modèles hybrides nous permettra de revenir sur ce dilemme de modélisation : s'attaquer frontalement à la représentation des déterminants des émissions de GES et conserver des trajectoires d'émission cohérentes pour assurer la crédibilité des travaux.

La modélisation en dynamique récursive présente un autre problème : l'absence d'anticipations des agents. Dans la plupart des modèles dynamiques récursifs, les consommateurs et les producteurs s'appuient uniquement sur les valeurs passées pour déterminer leurs comportements. Dans sa présentation, un auteur de ENV-Linkages, regrettait que l'absence d'anticipations des agents entrave l'analyse de certaines politiques environnementales. Ainsi, une politique qui consisterait à annoncer aujourd'hui des mesures qui s'appliqueraient à une date future (comme par exemple, la volonté européenne de baisser de 20% les émissions de GES sur la période 2012- 2020) ne donnerait lieu à aucune anticipation ce qui est pourtant un des principaux objectifs de ces mesures. Si l'absence d'anticipation semble à première vue rédhibitoire notamment au vu des développements récents des modèles macroéconomiques, la réalité de la modélisation énergie-climat nous pousse à nuancer ce propos.

La prise en compte des anticipations pourrait se faire grâce aux mécanismes d'optimisation inter-temporelle. Cette méthode consiste à résoudre le modèle pour toutes les périodes en même temps. Elle permet d'estimer l'impact sur les trajectoires d'émissions d'anticipations parfaites des agents. Malgré son attrait apparent, les modèles qui l'utilisent dans le champ

énergie climat sont assez peu nombreux : MERGE⁹, MESSAGE¹⁰, GRAPE¹¹ sont les plus connus. Cette rareté souligne le compromis nécessaire entre représentation technique et prise en compte des anticipations. Une optimisation inter-temporelle implique un nombre de calculs beaucoup plus important qu'en dynamique récursive. Si l'on prétend représenter plusieurs secteurs, plusieurs régions du monde et en plus inclure une représentation fine de la technologie pour appréhender les implications techniques des différentes trajectoires d'émissions, le modèle devient alors difficilement manipulable.

Ces différences de structure ont aussi un impact fort sur les résultats des modèles. Dans un modèle avec des anticipations rationnelles, les agents modifient leur comportement pour s'adapter aux nouvelles contraintes liées aux politiques environnementales : ils investissent dans les secteurs qui profiteront de ces contraintes ou adaptent leur consommation en fonction des modifications du système de prix. Les coûts de la régulation environnementale sont donc sensiblement moins élevés. Dans un exercice de modélisation de l'Energy Modeling Forum que nous présenterons en détail, plusieurs modèles avaient simulé la valeur d'une tonne de carbone en 2050 pour un objectif commun de concentration. En analyse coût-efficacité comme nous le détaillerons également, la valeur d'une tonne de carbone est un indicateur du coût des efforts nécessaires pour réduire les émissions de GES. Ces efforts étant anticipés dans un modèle en optimisation inter-temporelle, les coûts engendrés sont en général moins importants comme l'illustre le graphique 1.

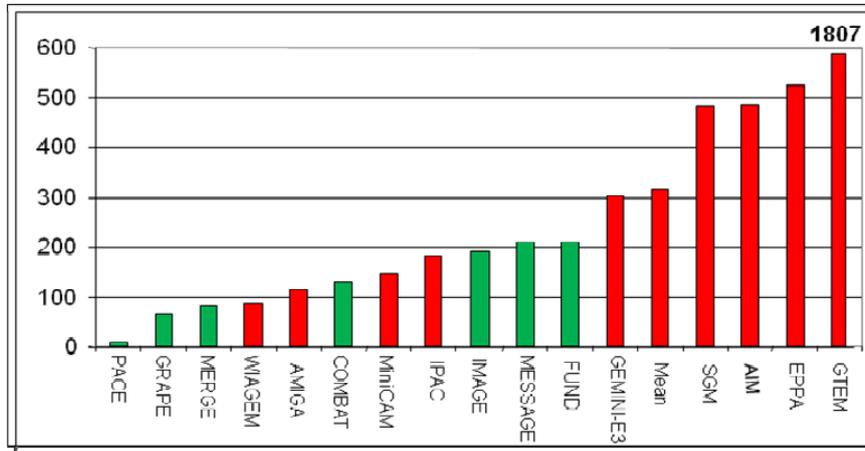
⁹ Manne & al. (1995)

¹⁰ Messner & Strubegger (1995).

¹¹ Kurosawa (1999).

Graphique 1. Prix du carbone en 2050 (2000 US\$/tC)

Objectif de réduction : revenir en 2100 aux émissions de GES de 2000



Vert : optimisation inter-temporelle ; rouge : dynamique récursive.

Source : Bernard, Vielle (2008b)

La représentation des anticipations ne constitue cependant qu'une partie des critères qui permettent de différencier les modèles. Cet axe d'analyse permet d'opposer les modèles qui s'appuient sur des scénarios exploratoires aux modèles qui s'appuient sur des scénarios normatifs.

2.2.2. Scénarios exploratoires versus scénarios normatifs

Un scénario exploratoire, associé le plus souvent aux modèles dynamiques récursifs, analyse période après période l'évolution des principales variables macro-économiques affectées par des contraintes carbone. Le modélisateur ne connaît pas à l'avance les trajectoires engendrées par le modèle même si le respect de sentiers exogènes pour certains indicateurs clés décrit ci-dessus invite à nuancer le caractère exploratoire de ces scénarios. Un scénario normatif, associé le plus souvent aux modèles en optimisation inter-temporelle, permet de mettre en évidence la trajectoire de certaines variables définie immédiatement pour toutes les périodes et considérée comme optimale suivant les critères du modélisateur. Cet axe d'analyse s'applique aux deux catégories de modèles : Bottom-Up et Top-Down.

On distingue donc deux formes de modèles Bottom-Up :

- Les modèles Bottom-Up exploratoires : Ces modèles décrivent les technologies existantes, les stocks et les flux d'énergie pour chaque période. Les éléments dynamiques du modèle, déjà évoqués dans la première sous-partie, représentent les modifications de la concurrence entre types d'énergie via les choix d'investissement,

les gains d'efficacité et la direction du progrès technique. Le modèle POLES en France ou TIMER¹² aux Pays-Bas appartiennent à cette catégorie.

- Les modèles Bottom-Up normatifs : aussi appelés modèles d'optimisation du secteur énergétique. Ils calculent de manière normative les investissements optimaux pour minimiser le coût complet de la fourniture de services énergétiques finals donnés. Lorsqu'ils sont soumis à une contrainte carbone, comme un plafond d'émissions de GES, ils calculent la réorientation optimale sur toute la période concernée du système énergétique qui satisfasse à la fois la contrainte d'émissions et la demande exogène de services énergétiques : on obtient au final des coûts purement techniques de cette réduction d'émissions. La famille de modèles MARKAL, dont MARKAL France, et le modèle MESSAGE (utilisé notamment par le GIEC) appartiennent à cette catégorie.

Pour les modèles Top-Down :

- Les modèles Top-Down exploratoires : on trouve dans cette catégorie les modèles d'équilibre général calculable. D'inspiration néo-classique, ils décrivent explicitement les préférences des consommateurs et les possibilités techniques des secteurs à travers des agents représentatifs, avec de nombreuses variantes concernant le mode d'anticipations des agents, les hypothèses d'optimalité des comportements, la désagrégation sectorielle et régionale. Nous leur accorderons une importance particulière tout au long de ce travail. En France, GEMINI-E3 et ENV-Linkages entrent dans cette catégorie. Dans le monde, on compte l'EPPA (MIT), Worldscan, WIAGEM ou AMIGA.

Cette catégorie comprend également des modèles qui s'appuient sur un schéma néo-keynésien d'ajustement à court terme par les quantités qui prolongent les comportements passés. La demande finale de biens est le principal déterminant d'une économie qui peut être caractérisée par des déséquilibres temporaires – chômage conjoncturel, sous-utilisation des capacités de production – liés aux délais d'ajustement des quantités. Ces modèles, comme HERMES, E3MG ou NEMESIS, ont été initialement conçus pour analyser les impacts de politiques environnementales de faible ampleur à court et moyen terme (5 à 20 ans) et sont donc très peu utilisés sur la scène internationale pour simuler des politiques de réduction ambitieuses à long terme.

- Les modèles Top-Down normatifs : appelés également modèles intégrés de contrôle optimal. Ils modélisent les trajectoires de réduction des émissions qui minimisent les pertes en termes de bien-être collectif. Ces modèles peuvent être ensuite utilisés pour effectuer des arbitrages inter-temporels entre coûts de réduction et coût du dommage climatique évité dans une approche coût/bénéfice. La description des systèmes techniques passe par des fonctions agrégées de coûts marginaux d'abattement, calibrées sur le comportement des modèles technico-économiques ou des modèles d'équilibre général présentés ci-dessus. Un certain nombre de ces modèles intègrent

¹² de Vries & al. (2001).

également de manière exogène l'émergence de nouvelles technologies non carbonées, renouvelables et en quantité infinie (technologies backstop). Le plus connu est le modèle DICE de William Nordhaus et sa version régionalisée RICE. On compte également MIND, ENTICE et RESPONSE.

Si ces axes d'analyse (Bottom-Up/Top-Down et exploratoire/normatif) permettent un classement synthétique des modèles en grandes familles, les dix dernières années ont vu le développement de modèles dits hybrides couplant différentes classes de modèles : couplage d'un modèle Bottom-Up et un modèle de contrôle optimal (MERGE, MARKAL-MACRO), couplage d'un MEGC et de modèles sectoriels physiques (SGM, IMACLIM-R).

2.3. Coupler les modèles préexistants : les tentatives d'hybridation

Nous avons vu dans la première partie que les familles Bottom-Up et Top-Down souffraient chacune de faiblesses. Pour palier ces faiblesses et offrir des outils plus complets pour la simulation des politiques de réduction, certaines équipes ont développé depuis une quinzaine d'années des modèles couplant des éléments de chaque famille ; ces modèles sont dits hybrides.

L'hybridation peut être variée : en couplant un modèle Bottom-Up avec un modèle de contrôle optimal (MERGE, MARKAL-MACRO), en couplant un modèle d'équilibre général avec des modèles sectoriels physiques détaillés (SGM, IMACLIM-R). Mais qu'ils soient originellement Bottom-Up ou Top-Down, ces modèles hybrides ont en commun de vouloir répondre à des enjeux communs qui les différencient fortement des grandes familles conventionnelles.

2.3.1. Les enjeux de la modélisation énergie-climat de long terme pour les modèles hybrides

Cette partie s'appuie largement sur la présentation de IMACLIM-R par Renaud Crassous¹³.

Bien qu'ils ne soient pas exempts de carences comme nous le montrerons, les modèles hybrides présentent néanmoins l'avantage de prendre acte des difficultés respectives des grandes familles de modèles et d'aborder frontalement les enjeux qui sous-tendent toute modélisation climatique de long terme :

Renforcer la cohérence des scénarios de long terme : les modèles Top-Down analysent toute politique environnementale en variations par rapport à un scénario de référence (baseline) dont nous étudierons l'importance dans la partie 3.2. Qu'il soit issu des travaux du GIEC ou construit par les modélisateurs, ce scénario de référence est souvent obtenu en utilisant l'identité de Kaya. Cette formule permet de décomposer la variation des émissions de CO₂ comme le produit de quatre variables significatives : la population (POP), le PIB par tête

¹³ Voir Crassous (2008).

(PIB/POP), l'intensité énergétique du PIB (ENE/PIB), et enfin l'intensité en CO₂ de l'approvisionnement énergétique (CO₂/ENE) :

$$\text{CO}_2 = (\text{CO}_2/\text{ENE}) \times (\text{ENE}/\text{PIB}) \times (\text{PIB}/\text{POP}) \times \text{POP}.$$

Chaque facteur de ce produit est fixé en utilisant des tendances exogènes issues des travaux de l'ONU, de l'AIE ou de l'OCDE. Sans mise en cohérence, le nombre de combinaisons possibles s'avère très important et les équipes de modélisateurs doivent alors faire un choix pour définir leur scénario de référence.

Ce choix doit répondre à un double impératif. D'un côté, les itinéraires techniques (partie Bottom-Up) doivent être compatibles avec les capacités de financement, les signaux-prix, les schémas de demande finale (partie Top-Down). De l'autre, les sentiers de croissance doivent être contraints par leur contenu physique et technique.

Bâtir une architecture cohérente entre le système énergétique et le reste de l'économie : pour étudier l'évolution du système énergétique en équilibre partiel, les modélisateurs Bottom-Up invoquent le fait que, au vu de la faible taille du secteur de l'énergie, les tendances animant le reste de l'économie masqueraient totalement les mécanismes propres au secteur. Cet argument est souvent illustré par une citation de William Hogan et Alan Manne de 1997 pour décrire les interactions entre énergie et économie : « Si pour faire un pâté on utilise un lapin (le secteur de l'énergie) et un éléphant (le reste de l'économie), est-ce qu'il n'aura pas un goût de pâté d'éléphant ? » (cité par Gherzi & Hourcade (2006)). Si cet inconvénient reste négligeable pour des déviations du scénario de référence de faible ampleur, il semble beaucoup moins acceptable quand des chocs extérieurs importants, comme les chocs pétroliers des années 1970, ou des objectifs de long terme ambitieux, comme la décarbonisation de l'économie, requièrent des changements drastiques. Un autre enjeu des modèles hybrides est donc de modéliser les interactions entre secteur énergétique et reste de l'économie pour souligner les lieux de compétition et d'arbitrage.

Intégrer les découvertes récentes dans la connaissance des sources d'émissions de GES : la force des modèles Bottom-Up réside principalement dans la connaissance des potentiels techniques : effets rebonds, forces de convergence, inertie des équipements et des technologies. Un modèle hybride doit pouvoir intégrer ces expertises pour faciliter le dialogue entre économistes et ingénieurs.

Ces enjeux, auxquels répondent les tentatives d'hybridation, remettent en cause les modèles conventionnels, aussi bien en ce qui concerne leur représentation de la technologie que leur structure dynamique, que nous avons identifié comme principaux axes d'analyse. Les tentatives d'hybridation sont très variées aussi bien du point de vue de l'ambition que des méthodes utilisées. Nous nous appuyerons sur la présentation de GEMINI-E3 et d'IMACLIM-R pour illustrer ce propos.

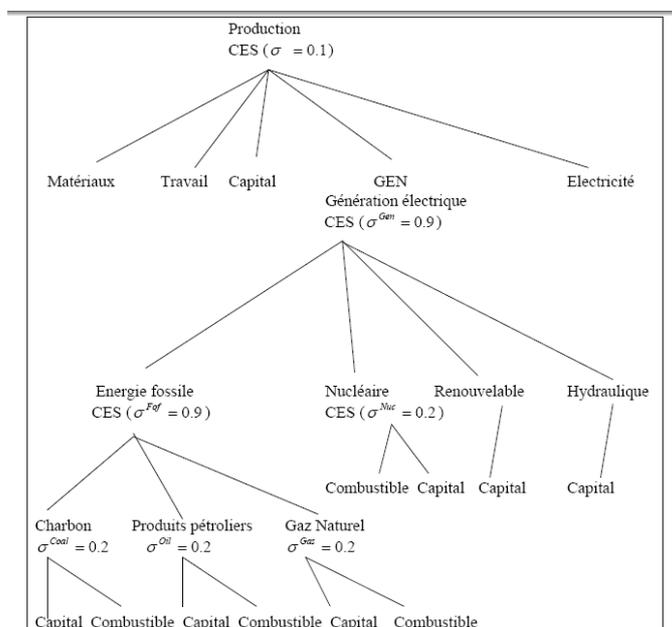
2.3.2. Renforcer le contenu technique des modèles d'équilibre général calculable

Les exercices décrits ci-dessous ne concernent pas à proprement parler des modèles hybrides, comme l'est IMACLIM-R, que nous décrirons par la suite. Ils se font sur des modèles Top-Down auxquels on intègre une description plus fine des technologies : on parlera plutôt de tentatives d'hybridation ou plus simplement de renforcement technique de modèles d'équilibre général calculable. Ces exercices tendent à prouver que la prise de conscience des faiblesses inhérentes à chaque catégorie conventionnelle de modèles et les améliorations apportées en réponse à ces faiblesses rendent la frontière entre catégories moins marquée.

Il faut noter en particulier les améliorations apportées aux modèles Top-Down ces dernières années. Pour GEMINI-E3, ce renforcement technique est passé notamment par une désagrégation plus fine du secteur électrique. Ce secteur joue un rôle central dans la compréhension des trajectoires d'émissions de GES : spécificités de chaque pays quant à son approvisionnement électrique (centrales nucléaires, centrales à charbon...) qui déterminent les émissions, développement des énergies renouvelables dans la production d'électricité...

Dans GEMINI-E3, le secteur électrique est représenté à partir d'un emboîtement de fonctions de production CES décrivant explicitement les capacités installées dans les différents types de centrale comme l'illustre le graphique 2.

Graphique 2. Représentation de la production d'électricité dans GEMINI-E3 Long-Terme



Source : Bernard et Vielle (2008a).

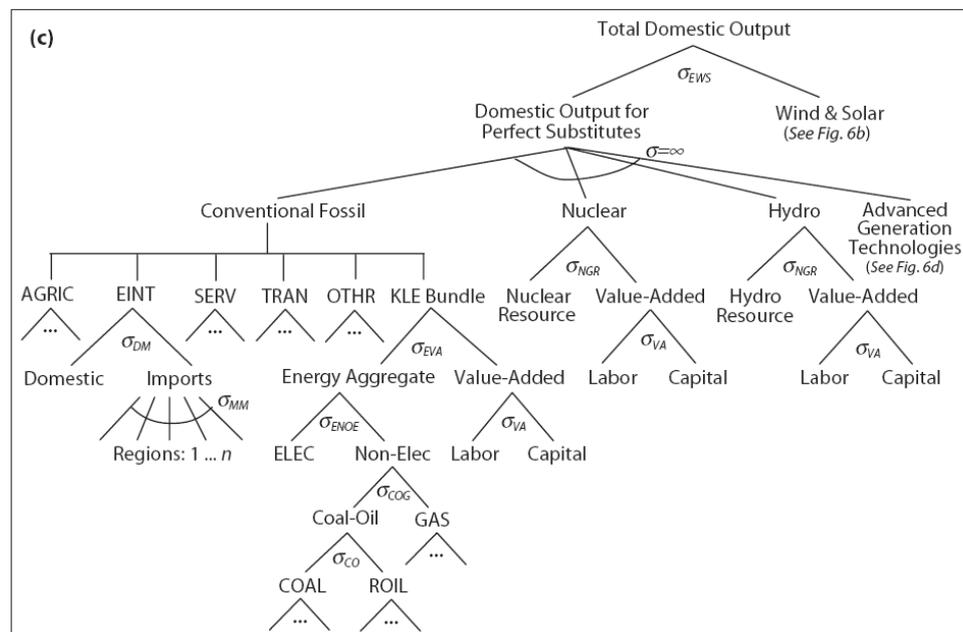
En haut de l'arborescence, les modélisateurs ont séparé les activités de génération et les autres activités du secteur (distribution et transport) qui restent agrégés sous l'étiquette « électricité ». L'activité de génération d'électricité est supposée n'être réalisée qu'à partir de capital (les centrales électriques) et de combustible (pour les énergies renouvelables et hydraulique, celui-ci est absent). Cette décomposition ne prend pas en compte les coûts de main d'œuvre et de consommations intermédiaires autres que le combustible. Les auteurs de GEMINI-E3 justifient cette simplification en expliquant que d'une part ces dépenses ne diffèrent pas sensiblement suivant les différents types de centrale et que d'autre part elles ne représentent qu'un poids limité dans les coûts de production d'électricité. Si elle ne paraît pas abusive, cette simplification est sûrement discutable et d'autres modèles Top-Down comme l'EPPA (MIT) n'y recourent pas. Elle est en tout cas le reflet d'un compromis entre détailler techniquement les structures économiques et garder un modèle simple et maîtrisable.

La modélisation distingue ensuite six types de centrales : les centrales nucléaires, les centrales à charbon, à gaz naturel et à produits pétroliers, les centrales hydrauliques et les centrales associées aux énergies renouvelables (principalement l'éolien en Europe). L'arbitrage se fait d'abord entre centrales thermiques classiques (énergie fossile), nucléaires, hydrauliques et renouvelables avec une élasticité de substitution entre ces quatre types de production égale à 0,9. La répartition de la production d'électricité issue de l'énergie fossile entre centrales à charbon, à gaz ou à produits pétroliers se fait elle aussi avec une élasticité de substitution de 0,9. Pour chacune des centrales, le modèle prend en compte la capacité installée (exprimée en Gigawatts électriques) dont l'évolution dépend des décisions d'investissement et du déclassement des équipements existants. Ces tentatives d'hybridation de modèles Top-Down n'améliorent donc pas seulement la compréhension technique des trajectoires d'émissions de GES ; elles permettent aussi à terme de relier les mécanismes économiques à des valeurs physiques (notamment en GWe) et cette liaison facilite leur intégration dans des modules climatiques plus larges.

Il est difficile de présenter les améliorations apportées à la représentation des technologies dans les modèles Top-Down sans évoquer le modèle Emissions Provisions and Policy Analysis¹⁴ (EPPA) du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Dans le champ énergie-climat, EPPA est le MEGC le plus abouti notamment grâce à son détail technique. Reprenons la description du secteur électrique détaillé pour GEMINI-E3. EPPA conserve la présentation en emboîtement de fonctions CES (graphique 3).

¹⁴ Voir MIT (2008).

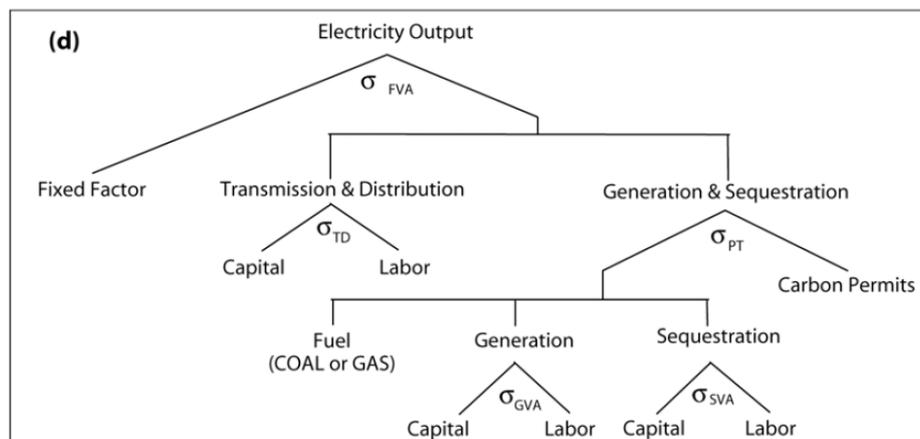
Graphique 3. Représentation de la production d'électricité dans le modèle EPPA



Source : Paltsev et al. (2005).

La première branche représente la répartition entre les énergies solaire et éolienne et un panier d'énergies supposées parfaitement substituables entre elles. Le solaire et l'éolien sont ici traités comme des substituts imparfaits en raison des caractéristiques propres à ces sources d'énergie : si elles sont parfaitement adaptées à certaines régions, l'intermittence qui caractérise leur rendement élève leur coût si elles doivent fournir une part importante de la consommation d'électricité. σ_{EWS} tient également compte de la pénétration progressive de ces nouvelles technologies conditionnée par une hausse des prix des autres énergies. Les sources d'énergie traditionnelles représentées sur le « nest » suivant sont considérées comme des substituts parfaits. La branche « advanced generation technologies » permet de représenter les nouvelles techniques actuellement développées pour limiter les impacts de la consommation d'énergies fossiles sur les émissions de GES, notamment la capture et séquestration de carbone, comme l'illustre le détail de cette branche (graphique 4).

Graphique 4. Représentation de la branche « advanced generation technologies » dans le modèle EPPA



Source : MIT, modèle EPPA.

Plus généralement, le modèle EPPA incorpore un grand nombre de nouvelles technologies comme le montre le tableau 3.

Tableau 3. Nouvelles technologies incluses dans EPPA

Technology	Description
Coal Gasification	Converts coal into a perfect substitute for natural gas.
Shale Oil	Extracts and upgrades bitumen from shale into a perfect substitute for oil
Biomass Oil	Converts biomass into a perfect substitute for refined oil.
Biomass Electricity	Converts biomass into a perfect substitute for electricity.
Wind and Solar	Converts intermittent wind and solar energy into an imperfect substitute for electricity.
Advanced Gas	Based on natural gas combined cycle (NGCC) electricity generation technology that converts natural gas into electricity.
Advanced Gas with Carbon Capture and Sequestration	Natural gas combined cycle technology that captures 90% or more of the CO ₂ produced in generating electricity.
Advanced Coal with Carbon Capture and Sequestration	Integrated coal gasification combined cycle (IGCC) that capture 90% or more of the CO ₂ produced in generating electricity.

Source : MIT, modèle EPPA.

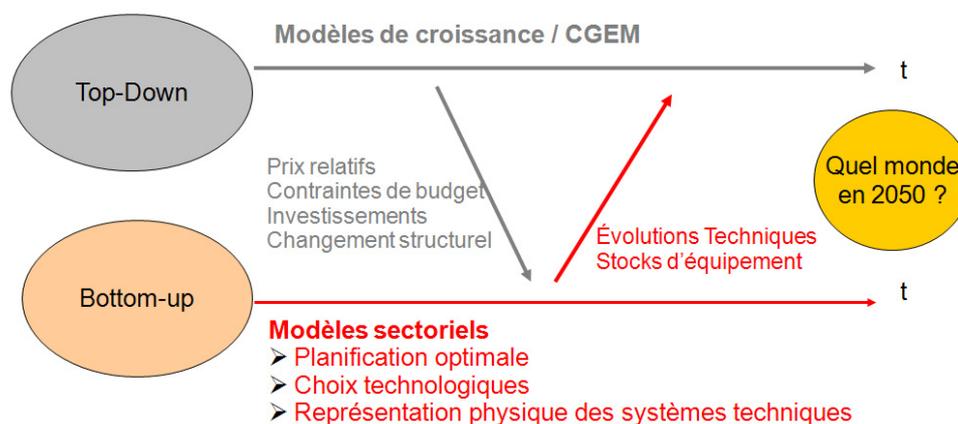
Mais si cette désagrégation technique fait de EPPA le modèle d'équilibre général calculable le plus complet du champ énergie-climat, en revanche elle ne résout pas non plus un problème fondamental des modèles Top-Down : les adaptations structurelles de l'économie à de nouvelles données environnementales ne sont pas représentées. Intégrer de nouvelles technologies à des MEGC se heurte à de nombreuses incertitudes : quelles seront les modalités de mise en place de ces technologies ? à quel horizon adviendra cette émergence ? à quel prix ? Ces incertitudes pourraient se résumer en une seule question cruciale : quelles élasticités de substitution attribuer à ces nouvelles technologies ? Une première solution

pourrait être de calibrer ces élasticités en fonction de séries historiques mais le caractère embryonnaire de ces technologies implique une rareté des données passées. Une autre solution pourrait être une évaluation de ces possibilités de substitution grâce à des études d'experts du secteur énergétique. Une telle démarche renvoie à celle plus radicale des modèles hybrides que nous allons maintenant détailler.

2.3.3. Les modèles hybrides et le dialogue entre Bottom-Up et Top-Down

A l'origine de la démarche qui aboutit à la construction de modèles hybrides comme IMACLIM-R, il y a un regard critique aussi bien sur la représentation de la technologie que sur les éléments de dynamique développés dans les modèles conventionnels. Pour illustrer ce propos, nous étudierons la structure dynamique d'IMACLIM-R décrite dans le graphique 5.

Graphique 5. Structure dynamique de IMACLIM-R.



Source : R. Crassous, *Le modèle IMACLIM-R*, présentation au CEPII, 15 mai 2008.

Cette architecture décrit la coexistence de rigidités de court terme et d'une flexibilité à long terme, idée développée par Marshall et Johansen dès 1930. A la période t , les possibilités de substitution entre facteurs de production, entre technologies ou entre sources d'énergie sont nulles. Ces fonctions de type Leontief permettent de modéliser les rigidités des structures économiques à court terme, l'ajustement se faisant par le taux d'utilisation de chaque facteur de production. Le modèle d'équilibre général calculable fournit alors pour la période t un système de prix, des contraintes de budget pour chaque entreprise, les potentiels d'investissement. Ces informations sont ensuite intégrées à des modèles sectoriels (Bottom-Up) ou à des modules technologiques très spécialisés qui permettent de représenter les évolutions des technologies et des stocks d'équipement sous ce système de contraintes et d'incitations économiques. Les résultats de ces modules sont ensuite réintégrés au modèle Top-Down à la période $t+1$ en modifiant les coefficients inputs-outputs et le niveau des capacités installées. La flexibilité des technologies est rendue possible par les nouveaux investissements.

Le principal mérite d'IMACLIM-R et des modèles hybrides est de s'attaquer directement à la représentation des déterminants des émissions de GES et des possibilités d'adaptation structurelle de nos économies. La méthode consistant à « casser la fonction de production » en supposant des élasticités de substitution nulles à court terme et en modélisant les modifications structurelles grâce à des modules Bottom-Up permet de détailler finement les processus de réductions d'émission. IMACLIM-R présente des modules qui décrivent le secteur électrique, les ressources pétrolières, la production et l'utilisation de véhicules, l'impact du secteur résidentiel ou du secteur industriel (acier, ciment, aluminium). La partie dynamique du modèle inclut également des fonctions de réaction synthétisant les impacts de politiques environnementales sur le fret, l'efficacité du secteur agricole, la construction d'infrastructures de transport.

L'architecture mêlant MEGC et modules techniques détaillés suppose également une double comptabilité monétaire et physique. Dans IMACLIM-R, les données physiques concernent les capacités de production, les coefficients techniques, les stocks physiques (véhicules par habitant, m² de logement) et les prix relatifs (\$/baril, \$/tonne de carbone). Cette double comptabilité représente un travail lourd – notamment pour traduire les matrices de comptabilité sociale en données physiques – et qui n'est pas exempt d'arbitraire dans les choix des modélisateurs ; ces choix ont sans doute des conséquences sur les résultats des modèles.

Mais si les avantages des modèles hybrides semblent importants, ils sont également soumis à des carences dont il faut avoir conscience. La volonté des modèles hybrides de rendre endogènes certaines variables, présentées sous forme de trajectoires exogènes dans d'autres modèles, comporte le risque d'aboutir à des projections sensiblement différentes, comme le prouve la simulation d'IMACLIM-R réalisée pour le Conseil d'Analyse Stratégique que nous détaillerons dans la troisième partie. Si l'origine de ces écarts est bien une tentative d'améliorer la modélisation des déterminants des trajectoires d'émissions, l'architecture macro-économique de modèles comme IMACLIM demeure néanmoins imparfaite. Plus fondamentalement, la construction dans IMACLIM de modules spécialisés au gré des simulations pose le problème de la cohérence du modèle. Le risque est grand de voir le modèle se comporter comme une boîte noire que ni les économistes ni les ingénieurs ne peuvent totalement appréhender. Comme dans tout exercice de modélisation, IMACLIM-R doit s'efforcer de trouver un compromis entre description des mécanismes économiques et techniques et simplicité du modèle favorisant son utilisation et son amélioration.

Le passage à un exemple pratique – la détermination de la valeur d'une tonne de carbone – nous permettra d'analyser les impacts de ces différences entre catégories de modèles sur les résultats de simulations et leur utilisation dans le débat public. Avant de passer à cette troisième partie, le tableau 4 synthétise le classement des principaux modèles climatiques selon leur représentation de la technologie et des éléments dynamiques.

Tableau 4. Paradigmes de modélisation

	Scénario exploratoire	Scénario normatif
Bottom-Up	France : POLES et MEDEE-ME (ENERDATA) Monde : TIMER, AIM, MiniCam	Optimisation énergétique France : EFOM (années 70), MARKAL France Monde : MARKAL et MESSAGE
Top-Down	MEGC néo-classique France : ENV-Linkages et GEMINI-E3 Monde : EPPA (MIT), WorldScan, WIAGEM, AMIGA Néo-kéynésiens HERMES, E3MG et NEMESIS	Contrôle optimal Monde: DICE, RICE et COMBAT
Modèles hybrides		
Couplage Bottom-Up et scénario normatif : MERGE (Stanford) et MARKAL-MACRO Couplage Top-Down/Bottom-Up en scénario exploratoire : IMACLIM-R (Cired) et SGM		

Source : R. Crassous, *Le modèle IMACLIM-R, présentation au CEPII, 15 mai 2008.*

3. UN EXEMPLE D'APPLICATION DES MODÈLES : DÉTERMINER LA VALEUR ÉCONOMIQUE DE LA TONNE DE CO₂

Si l'analyse critique des fondements théoriques des modèles climatiques était préalablement nécessaire, elle doit s'accompagner de l'étude d'un cas pratique qui illustre les utilisations possibles de ces modèles et l'impact des différences de structure sur les résultats. Nous nous appuyerons sur le travail de la commission réunie par le Conseil d'Analyse Stratégique au premier semestre 2008. Cette commission présidée par Alain Quinet avait pour but de proposer une nouvelle valeur tutélaire du carbone pour l'évaluation environnementale des politiques publiques¹⁵.

Comme nous allons le détailler ci-après, donner une valeur à la tonne de carbone est un pilier de toute tentative de régulation environnementale. Pour appuyer sa réflexion, la Commission a demandé à trois équipes de modélisateurs de simuler des trajectoires pour la valeur carbone. Les trois modèles, présentés au CEPII en séminaires techniques (voir comptes-rendus en annexe), sont représentatifs des grandes familles décrites dans la première partie : POLES

¹⁵ Centre d'analyse stratégique (2009).

(Bottom-Up), GEMINI-E3 (Top-Down) et IMACLIM-R (hybride). Ce cas pratique va donc nous permettre de mener une analyse comparée des impacts des structures méthodologiques sur les résultats.

3.1. L'intérêt d'une valeur économique de la tonne de carbone

La convergence des analyses scientifiques sur le réchauffement climatique et ses conséquences – expertisées par le GIEC – ne permet plus de différer les efforts nécessaires pour réduire substantiellement nos émissions de GES. Cependant, le choix des actions à engager ainsi que les priorités de calendrier s'avèrent complexes à définir, les conséquences sociales et économiques pour la France, l'Europe et le reste du monde étant importantes. Face à ce défi, alors que les contraintes budgétaires imposent une rationalisation des dépenses, l'action publique doit pouvoir disposer d'instruments de mesure. La grande majorité des études économiques sur l'environnement prouvent que la valeur de la tonne de carbone est un des indicateurs les plus importants.

3.1.1. Un référentiel partagé pour assurer la cohérence des politiques publiques

Dans la littérature académique et les nombreux débats sur ce sujet, il existe une myriade de valeurs de la tonne de carbone (ou valeur de la tonne de CO₂) reposant sur des concepts théoriques, des méthodes de calcul et des hypothèses de cadrage différents. La cohérence de l'action publique ne peut se satisfaire de cette multiplicité de valeurs et le but de la Commission Quinet était de mettre en place un référentiel partagé. Rappelons qu'une tonne de dioxyde de carbone (CO₂) contenant 3/11èmes de tonne de carbone (C), la valeur tutélaire de 100 € la tonne de carbone fixée par le rapport Boiteux de 2001 correspond ainsi à une valeur de 27 € la tonne de dioxyde de carbone.

La valeur carbone est un problème classique d'économie publique. L'émission de gaz à effet de serre est un effet externe négatif des comportements des agents économiques. Donner un prix à cette externalité permet de restaurer l'efficacité des marchés en internalisant les effets externes.

Cette internalisation trouve plusieurs applications concrètes :

- **Éclairer les choix d'investissements publics** : la prise en compte systématique d'une valeur carbone permettrait la réalisation de certains investissements dont la rentabilité socio-économique n'apparaît pas suffisante aujourd'hui, les gains relatifs à la lutte contre l'effet de serre étant sous-évalués.
- **Évaluer la pertinence environnementale des politiques publiques de réglementation, de subventions ou de dépenses budgétaires** : une valeur carbone permet d'éclairer les arbitrages entre les différents efforts de réduction d'émissions ainsi que leur répartition entre les différents secteurs. Chaque processus de réduction des émissions (par amélioration des techniques, par capture du carbone ou par

substitution d'une production d'énergie fortement émettrice de CO₂ par une autre qui l'est moins) conduit ainsi à une valeur de la tonne de carbone économisée qui peut être estimée et comparée à la valeur de référence pour déterminer l'intérêt de sa mise en œuvre.

- **Calibrer les instruments économiques de lutte contre le changement climatique :** Ce référentiel est une indication du signal-prix dont une économie a besoin pour réduire ses émissions. Cette internalisation peut être effectuée par un système de taxes (principe du pollueur payeur), de marchés de permis ou de normes et réglementations.
- **Servir de signal pour les acteurs publics et privés sur le prix du carbone auquel ils pourront être confrontés au cours des prochaines décennies :** cette application, citée par le CAS, est bien plus ambiguë car elle dépend fortement des évolutions techniques et des progrès dans les négociations internationales sur le climat qui demeurent soumis à de fortes incertitudes.

La théorie économique fournit quelques points de repère sur la valeur carbone : pousser l'effort de réduction des émissions tant que l'avantage que la société en retire reste supérieur au coût qu'il faut supporter pour l'obtenir, faire porter l'effort là où il est le moins coûteux à obtenir, valoriser clairement dans les calculs de rentabilité des projets d'investissements publics les gains sur l'effet de serre. Cependant les méthodes pour obtenir concrètement le prix du carbone sont diverses et toutes soumises à certaines faiblesses.

3.1.2. Comment obtenir concrètement le prix du carbone ?

La valeur du carbone associée aux coûts sociaux et économiques du changement climatique : une première approche de la valeur carbone consiste à partir de l'appréciation du coût associé au risque du changement climatique. Avec cette approche dite coûts-bénéfices, la valeur d'une tonne de carbone, ou plus exactement la valeur de la non-émission d'une tonne de carbone, se mesure au regard de l'impact qu'aurait cette tonne de carbone et le changement climatique engendré sur le système économique. On associe donc à une tonne émise aujourd'hui un dommage futur que l'on cherche à valoriser. Comme nous le montrerons dans la dernière partie, les valeurs obtenues avec cette approche – utilisée notamment dans le rapport Stern – sont très diverses (médiane à 4€/tC et moyenne à 25€/tC d'après Tol (2006)). Il faut toutefois avoir conscience que ces valeurs sont des valeurs planchers dans la mesure où seuls les effets les mieux compris, les plus facilement mesurables sont envisagés. En outre, ces valeurs ont tendance à être minorées par le processus d'actualisation retenu, comme nous le verrons plus bas. Si les économistes sont loin d'avoir abouti à un consensus sur cette valeur sociale du carbone, les chiffres produits intéressent les négociateurs notamment pour aborder les questions d'équité, d'égalité devant les efforts à fournir, voire pour négocier d'éventuelles compensations. Ce type d'approche intéresse également de plus en plus les grands assureurs par exemple qui cherchent à déterminer le coût des dommages que subiront leurs assurés (catastrophes naturelles, pandémies, etc.). Le marché commence par ce biais à internaliser un certain nombre d'effets du changement climatique.

La valeur du carbone associée aux coûts de réduction des émissions de CO₂ : il s'agit ici de considérer les coûts qu'il faut consentir pour réduire les émissions ; on parlera de coûts d'abattement du CO₂. Nous sommes ici dans le cadre d'une analyse coût-efficacité dans laquelle les objectifs de réduction fixés par les pouvoirs publics et les conditions dans lesquelles ceux-ci doivent être atteints déterminent la valeur carbone. En coût-bénéfice, plus les objectifs sont ambitieux, moins les dommages futurs sur l'économie seront importants et donc plus le prix de la tonne carbone sera faible. En coût-efficacité, plus les objectifs sont ambitieux, plus les efforts nécessaires seront importants et donc plus le prix de la tonne sera élevé. Dans un modèle d'équilibre, le prix du CO₂ est déterminé par le point où le coût marginal de réduction des émissions est égal au dommage marginal : les approches coût-bénéfice et coût-efficacité sont alors équivalentes.

Dans l'approche coût-efficacité, on construit des modèles qui représentent l'ensemble du système économique d'un pays pour calculer les impacts d'une contrainte carbone. La valeur carbone est alors fonction du modèle et de ses spécificités mais également des hypothèses générales retenues dans les simulations notamment celles qui fondent le scénario de référence (hypothèses sur la croissance, sur l'émergence de nouvelles technologies, sur le prix des matières premières, etc.). Nous reviendrons sur ces simulations à l'aide de modèles.

La valeur du carbone associée aux prix révélés par les marchés des permis d'émission : on peut également considérer les signaux que renvoient les marchés d'échange de quotas d'émission de CO₂ qui ont été mis en place en plusieurs endroits du monde suite à Kyoto. Ils devraient conduire à faire émerger des informations agrégées que la collectivité ne peut fournir et permettraient d'optimiser le coût de réduction des émissions pour la collectivité en orientant les efforts là où les coûts d'abattement sont les plus faibles.

Afin d'anticiper les échanges de permis d'émission prévus par le protocole de Kyoto, l'Union Européenne a choisi de mettre en œuvre, depuis le 1^{er} janvier 2005, un système d'échange de quotas (ETS). Avant de se stabiliser entre 20 et 25€ la tonne de CO₂ en 2008 (valeur légèrement inférieure à celle préconisée par le rapport Boiteux de 2001), le prix du carbone avait atteint des niveaux si faibles qu'ils nourrissaient le scepticisme sur la capacité des marchés à fournir des signaux crédibles pour l'action publique. Il a de nouveau baissé au dernier trimestre 2008 et en 2009 à cause de la crise économique. Quelques précisions sont utiles pour comprendre ces valeurs. L'horizon et le champ couvert par le marché restent limités (45% des émissions de CO₂ sur le territoire européen, provenant des principaux émetteurs des secteurs de l'industrie et de l'énergie, et laissant de côté les secteurs clés de l'agriculture, de l'habitat et des transports). Plus fondamentalement, le caractère fluctuant et erratique de marchés encore très imparfaits rend difficile leur prise en compte comme référentiel pour l'orientation à long terme de décisions structurantes des pouvoirs publics. Enfin, l'absence d'accords mondiaux sur le climat hypothèque fortement l'émergence d'un marché mondial du carbone. Il existe aujourd'hui un certain consensus pour intégrer les valeurs de marché aux débats sur la valeur carbone, mais la faible extension des marchés ne leur permet pas encore de jouer un rôle fondamental.

L'exercice réalisé par la Commission Quinet est de nature différente. Il s'agit de remplacer la valeur Boiteux datant de 2001 en tenant compte de différents impératifs :

- Cette valeur de référence est le résultat d'un compromis essayant de concilier un ensemble d'arguments défendus par des acteurs aux intérêts contradictoires.
- Cette valeur de référence doit permettre de respecter les engagements français et européens en termes d'émissions de GES : engagement ferme de l'UE de réduire ses propres émissions à l'horizon 2020 et objectif de réduction de 60 à 80% d'ici à 2050.
- Cette référence doit intégrer les progrès réalisés ces dernières années dans la modélisation économique du changement climatique en invitant trois modèles français, POLES, GEMINI-E3 et IMACLIM-R, à un exercice de simulation que nous allons maintenant détailler.

3.2. L'importance d'une définition cohérente du scénario de référence et des scénarii de contraintes

Comme nous l'avons souligné, les modèles utilisés pour la simulation de la Commission Quinet du CAS privilégient l'approche coût-efficacité consistant à fixer un objectif de concentration et à définir les politiques optimales pour l'atteindre. Deux étapes encadrent cette démarche. La première est la définition d'un scénario de référence : trajectoires des émissions si aucune politique environnementale nouvelle n'est menée. La seconde est la définition de scénarii de contraintes : objectifs de concentration à un certain horizon et conditions dans lesquelles ces objectifs peuvent être atteints.

Ces deux étapes influenceront fortement la valeur donnée à la tonne de carbone. Si le scénario de référence projette une croissance forte des émissions, les efforts pour tenir les objectifs de concentration seront plus importants et donc plus coûteux. De même si les scénarii de contraintes imposent des objectifs de concentration ambitieux ou de fortes entraves à la mise en place d'une régulation environnementale, les efforts nécessaires se traduiront par une valeur carbone élevée. Voyons comment sont construits ces scénarios.

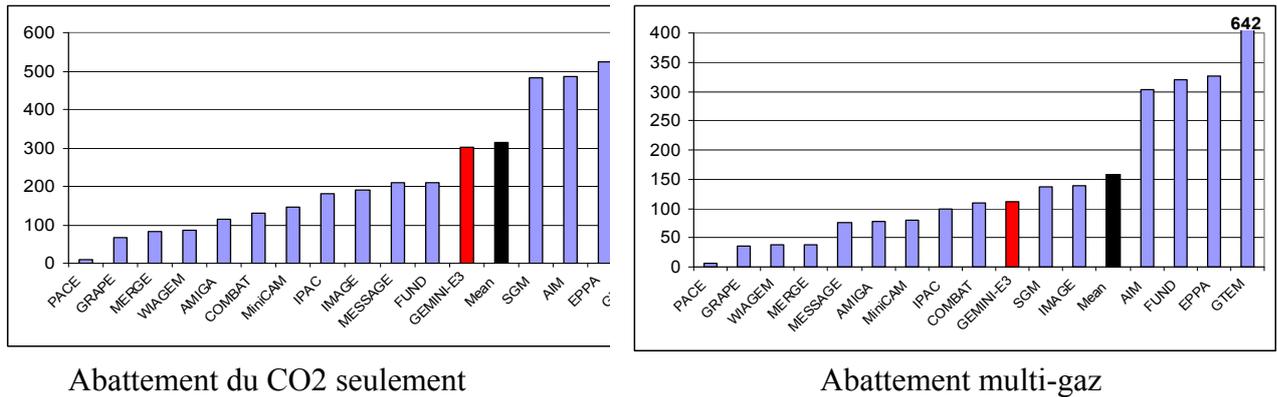
3.2.1. Une définition cohérente du scénario de référence

Le scénario de référence est un élément central de toute modélisation environnementale. Il permet d'évaluer les effets d'une politique de réduction des émissions en les comparant à l'évolution d'un monde sans contrainte carbone. Ce jeu d'hypothèses macro-économiques choisi par les modélisateurs influence très fortement les exercices de simulation.

Les auteurs de GEMINI-E3 en donnent comme exemple la simulation menée pour l'Energy Modeling Forum 21, avec 19 modèles, pour évaluer les gains d'une stratégie d'abattement multi-gaz couplant réduction des émissions CO₂ et celles moins coûteuses des GES non CO₂ (méthane, protoxyde d'azote). On avait fixé à ces modèles aux structures très différentes (Top-Down, Bottom-Up et hybrides) un objectif de concentration commun à 2100: un

pouvoir radiatif de 4,5 Watts/m², soit revenir en 2100 aux émissions de 2000. On obtient une dispersion considérable des valeurs carbone pour chacune des stratégies (CO2 seulement ou multi-gaz, voir graphique 6).

Graphique 6. Projections du prix du carbone en 2050 de l'Energy Modeling Forum 21 (moyenne en noir) (en \$US 2000/tCO2)



Source : Le Modèle GEMINI-E3, A. Bernard et M. Vielle, CEPII, 5 juin 2008.

Cette dispersion est principalement due à la diversité des scénarios de référence utilisés par les équipes de chercheurs et non aux différences de structure entre modèles. Reprenons l'identité de Kaya utilisée pour définir les trajectoires d'émission du scénario de référence et des scénarii de contraintes :

$$\text{CO2} = (\text{CO2/ENE}) \times (\text{ENE/PIB}) \times (\text{PIB//POP}) \times \text{POP}$$

où POP est la Population, PIB/POP le PIB par tête, ENE/PIB l'intensité énergétique du PIB et CO2/ENE l'intensité en CO2 de l'approvisionnement énergétique.

Chaque équipe de modélisateurs a choisi ses propres trajectoires pour chacun des facteurs de l'identité, ce qui engendre une multitude de combinaisons possibles. Le point crucial est de trouver un compromis entre l'autonomie accordée aux chercheurs dans leur choix d'hypothèses sur l'évolution de l'économie et la cohérence du scénario de référence nécessaire pour effectuer des comparaisons entre modèles. Une trop grande diversité dans les scénarii de référence masque, au niveau des résultats, les différences structurelles entre modèles.

Les travaux de simulation pour le CAS étaient beaucoup plus encadrés, ce qui permet une analyse comparative des résultats. En effet, le but de ces simulations n'était pas de balayer l'univers des possibles mais de permettre une discussion cohérente pour nourrir la réflexion sur une valeur tutélaire du carbone.

Trois éléments jouent un rôle clé dans la constitution de la baseline (scénario de référence):

- La croissance des grands agrégats et notamment du PIB : l'évolution de la structure économique a évidemment une forte influence sur les trajectoires d'émissions
- Le prix des matières premières énergétiques : cette variable détermine la substitution entre sources d'énergie et entraîne certains arbitrages (économies d'énergie, évolution vers des énergies renouvelables) cruciaux pour l'évolution vers des sentiers de production moins émetteurs en carbone.
- L'émergence de nouvelles technologies : nous avons déjà souligné l'importance des hypothèses technologiques dans la simulation des politiques environnementales. On peut insister sur une hypothèse précise : l'émergence ou non de technologies backstop. Une technologie backstop permet de faire disparaître toute ou une partie de la consommation de ressources fossiles en y substituant une énergie renouvelable non polluante. L'émergence de ces technologies est un choix exogène du modélisateur et a bien sûr des implications notables sur les trajectoires d'émissions.

La Commission Quinet a choisi d'imposer certaines hypothèses de travail pour chacun de ces trois éléments clés :

- Pour la croissance : le groupe a retenu les projections de l'AIE de 2007 (World Energy Outlook), soit un taux de croissance de 2 à 3% pour les pays développés et de 3 à 5% pour les pays émergents (BRIC). Au-delà de 2030, il a été décidé de prolonger les hypothèses du scénario de référence de l'AIE et d'intégrer un schéma de convergence des taux de croissance vers ceux des pays les plus matures, hypothèse développée notamment au sein d'IMACLIM-R. Ces hypothèses sont cohérentes avec d'autres projections tendanciennes, notamment celles du CEPII¹⁶ (tableau 5).
- Les prix des énergies sont gardés comme des variables endogènes, calculées dans les modèles. Cependant, les prix des scénarios de référence de l'AIE servent de points de repère.
- Pour les hypothèses technologiques, le cadrage retenu est celui de l'ETP (Energy Technology Perspectives) mais il est suffisamment peu contraignant pour que les choix des modélisateurs sur cette partie entraînent des profils de valeur carbone sensiblement différents comme nous le verrons.

¹⁶ Poncet (2006).

Tableau 5. Comparaison des hypothèses de PIB avec les projections tendanciennes du CEPII et de la Banque mondiale

PIB en Mrds \$2001	2001	2020			2050	
	FMI	IMACLIM 2020	CEPII 2020	Banque mondiale 2020	IMACLIM 2050	CEPII 2050
USA	10 082	15 767	17 000	16 645	31 829	38 600
Chine	1 323	5 671	4 140	4 049	13 689	14 000
Inde	483	1 786	1 260	1 417	6 605	4 530
Brésil	509	904	821	1 488	1 999	1 040

Source : Centre d'analyse stratégique (2009).

Enfin, la Commission n'a pas souhaité de concordance exacte entre les scénarios de référence des modèles en laissant par exemple une certaine liberté dans la représentation des technologies. Cependant, en imposant un certain nombre d'hypothèses macro-économiques, elle a donné une cohérence à la baseline qui nous permettra d'interpréter les différences de valeurs issues des modèles comme des conséquences de la variété de leur structure et non pas de la diversité des scénarii de référence.

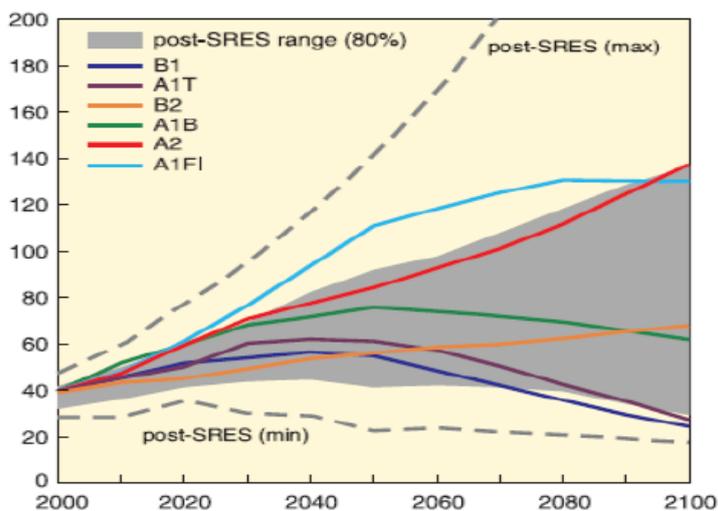
3.2.2. La construction des scénarii de contraintes

Le coût de politiques d'abattement est déterminé par les objectifs fixés et par les hypothèses faites sur le contexte dans lequel devront être atteints ces objectifs. Un travail d'expertise sur ces scénarii de contraintes a été mené par le GIEC, travail que l'on retrouve dans les quatre rapports (1990, 1995, 2001 et 2007). Les scénarii du GIEC, dits SRES peuvent être classés selon deux axes d'analyse : l'importance apportée aux critères environnementaux dans le processus de croissance et les mécanismes de coordination économique mondiale qui facilitent la mise en place de politiques climatiques internationales, plus efficaces et moins coûteuses (voir tableau 6).

Ces quatre familles peuvent être rapprochées de trajectoires d'émissions très diverses (graphique 7).

Tableau 6. Les familles de scénarios du GIEC (Rapport spécial 2000)

Les quatre familles de scénarii ^{2,3,4} du quatrième rapport et les prévisions des hausses de températures globales moyennes en 2100		
AR4	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
Globalisation (Monde homogène)	A1 Croissance économique rapide (groups: A1T/A1B/A1FI) 1.4 - 6.4 °C	B1 Durabilité environnementale globale 1.1 - 2.9 °C
Régionalisation (Monde hétérogène)	A2 Développement économique avec une orientation régionale 2.0 - 5.4 °C	B2 Durabilité environnementale locale 1.4 - 3.8 °C

Graphique 7. Projection d'émissions des scénarios SRES du GIEC (en gigatonnes de CO2 équivalent par an)

Source : GIEC 2007, Climate Change 2007, Synthesis Report

Source : Centre d'analyse stratégique (2009).

Pour son exercice de simulation, la Commission Quinet a bâti trois scénarios de contraintes qui respectent tous les engagements européens en matière de réduction des émissions. Ils se différencient dans les hypothèses sur la coordination de l'action au niveau mondial :

- **S1, scénario Europe seule** : aucune politique d'envergure n'est menée au niveau mondial hors de l'Europe. L'UE poursuit de manière isolée ses objectifs tels que définis par le Conseil en mars 2007 : réduction de 20% des émissions de GES en 2020 par rapport à 1990 et de 60% en 2050. Ces objectifs impliquent un taux de

décroissance des émissions en Europe de -1,5% par an entre 2010 et 2020, entre -2% et -2,5% entre 2030 et 2050. La valeur carbone simulée est alors propre à l'Europe.

- **S2, scénario mixte « des efforts coordonnés au niveau international »** : le contexte international est coopératif. L'Europe s'inscrit alors sur un profil de réduction plus ambitieux : -30% en 2020 par rapport à 1990, - 80% en 2050. Le reste du monde s'il met en œuvre des politiques climatiques reste très en retrait des objectifs européens. Il s'agit d'un scénario de type « stabilisation à 450 ppm pour le CO₂, ou 550 tous gaz » qui ne permettra pas d'atteindre l'objectif de ne pas dépasser une augmentation de 2°C. Dans ce cas, les émissions mondiales, après avoir crû de près de 3% par an depuis 2000, doivent se stabiliser entre 2020 et 2030 puis décroître de 1% par an entre 2030 et 2040 et 1,4% par an jusqu'en 2050. La décroissance des émissions est beaucoup plus forte en Europe puisqu'elle doit être de 4% par an après 2020. La valeur carbone est mondiale.
- **S3, scénario mondial volontariste** : les actions sont coordonnées au niveau mondial avec une gouvernance forte et un objectif ambitieux de se limiter à une augmentation de 2°C. Il s'agit d'un scénario de type « stabilisation à 400 ppm CO₂ ou 450 ppm tous gaz ». Les émissions mondiales, après avoir crû de 3% par an depuis 2000, doivent se stabiliser avant 2020 puis décroître de 2% par an entre 2020 et 2040 puis 4% jusqu'en 2050. La valeur carbone est mondiale.

Le tableau 7 et le graphique 8 résument les scénarios de contraintes et les réductions annuelles imposées par ces profils.

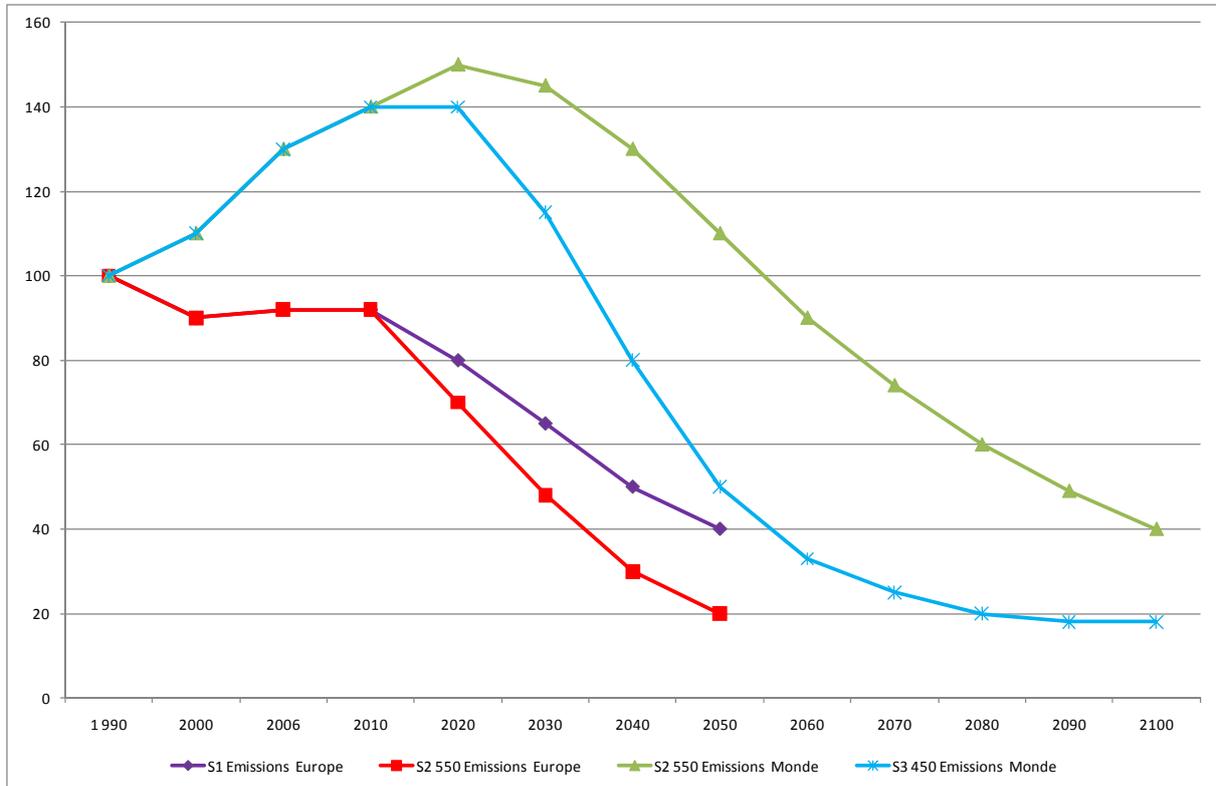
Tableau 7. Les trois scénarios de la Commission Quinet

Scénario de contraintes sur les émissions de GES	2020	2050	Accord international
	Objectif de réduction de l'Europe (base 1990)		
Scénario Europe seule	- 20 %	- 60 %	Aucun (valeur du carbone propre à l'Europe)
Scénario coordonné	- 30 %	- 80 %	Objectif 550 ppme (valeur du carbone unique à l'échelle mondiale)
Scénario mondial volontariste			Objectif 450 ppme (valeur du carbone unique à l'échelle mondiale)

Source : Centre d'analyse stratégique (2009).

Graphique 8. Profils d'émissions retenus dans les trois scénarios de contrainte de la Commission Quinet

(Indicés sur 1990)



Source : Centre d'analyse stratégique (2009).

Ces contraintes de réduction sont ensuite intégrées aux différents modèles pour estimer leurs coûts et par conséquent la valeur d'une tonne de carbone comme nous allons le voir maintenant.

3.3. Les principaux résultats des simulations et leur lien avec les structures des modèles

Le tableau 8 issu du rapport de la Commission Quinet présente les valeurs de la tonne de CO₂ à différents horizons pour les trois scénarii de réduction et pour les trois modèles. Ces valeurs sont également comparées à la valeur tutélaire précédente (valeur dite Boiteux).

Tableau 8. Récapitulatif des valeurs carbone (2008) des différents modèles par date et par scénario (€/tCO₂, \$/b)

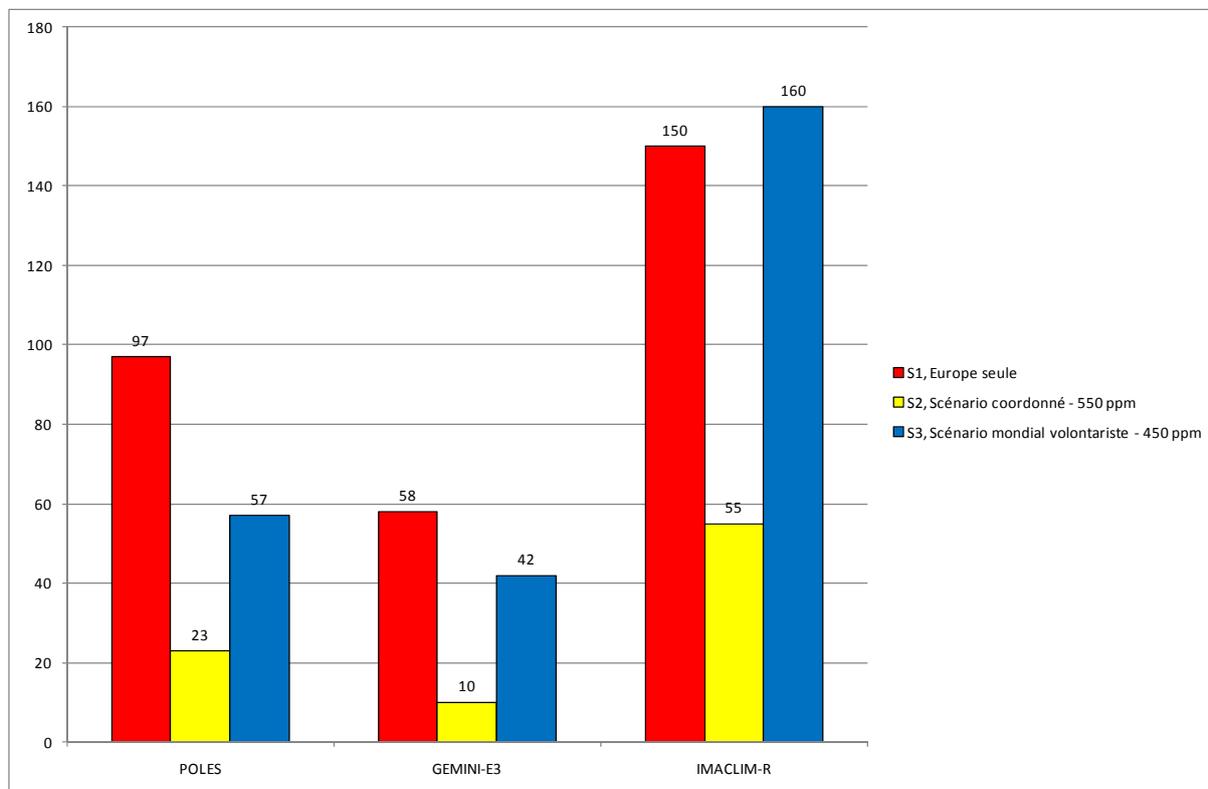
	Scénario Europe Seule UE €/tCO ₂	Scénario coordonné - 550 ppme €/tCO ₂	Scénario mondial volontariste - 450 ppme €/tCO ₂	Prix pétrole \$/b
En 2010				
POLES	10			
GEMINI-E3	1			
IMACLIM-R	45			
Moyenne	19			
Valeur tutélaire Boiteux	32			
En 2020				
POLES	26	9	16	79
GEMINI-E3	25	4	13	57
IMACLIM-R	95	30	100	93
Moyenne	49	14	43	76
Valeur tutélaire Boiteux	43			41
En 2030				
POLES	97	23	57	96
GEMINI-E3	58	10	42	62
IMACLIM-R	150	55	160	94
Moyenne	102	29	86	84
Valeur tutélaire Boiteux	58			50
En 2050				
POLES	319	85	682	130
GEMINI-E3	446	62	339	60
IMACLIM-R	130	60	200	114
Moyenne	298	69	407	101
Valeur tutélaire Boiteux	104			74

Source : modèles POLE, IMACLIM, GEMINI-E3

Source : Centre d'analyse stratégique (2009).

3.3.1. Différences liées aux scénarii de contraintes

Les résultats sont très sensibles au niveau de l'objectif poursuivi et à la coordination des efforts internationaux. On retrouve les mêmes différences qualitatives aux trois horizons temporels (2020, 2030 et 2050), je me concentrerai donc sur l'année 2030 pour les analyser.

Graphique 9. Valeurs carbone des trois modèles à l'horizon 2030 (€/tCO₂)

Source des données : Centre d'analyse stratégique (2009).

La comparaison entre les scénarios S2 et S3 souligne l'importance de l'objectif d'effort de réduction. A l'horizon 2030, avec un marché mondial du carbone dans les deux cas, un scénario 450 ppm génère une valeur carbone 2,5 fois plus élevée chez POLES, 4 fois chez GEMINI-E3 et 3 fois chez IMACLIM-R qu'un scénario 550 ppm. A l'horizon 2050, l'écart en moyenne est de près de 6 fois. Cet écart est étroitement lié à la structure même de l'analyse coût efficacité : une décarbonisation plus importante de l'économie implique des efforts contraignant aux coûts plus élevés.

La comparaison entre S1 et S2 illustre l'apparition de deux forces opposées dans la valorisation du carbone pour l'Europe. D'un côté, la mise en place dans S2 d'objectifs européens plus ambitieux (-30 % contre -20% en 2020 par rapport à 1990, - 80% contre -60% en 2050) devrait pousser la valeur carbone vers le haut. De l'autre côté, la mise en place d'un marché mondial permet aux pays européens de réduire les émissions au coût marginal le plus faible dans le monde. Pour l'Europe, la mise en place d'un scénario de coopération internationale l'emporte largement.

La comparaison entre S1 et S3 est plus ambiguë. Les mêmes forces agissent mais l'ensemble des pays s'étant engagés vers des politiques volontaristes, les opportunités pour trouver des réductions d'émissions à faible coût sont beaucoup plus restreintes. Ainsi POLES et GEMINI-E3 concluent que la mise en place d'une flexibilité internationale sur le marché du carbone permet toujours de faire baisser sensiblement le prix par rapport au scénario d'Europe isolée. En revanche, pour IMACLIM-R, les valeurs carbone entre S1 et S3 sont très proches.

Soulignons enfin que les trois modèles se situent dans les intervalles proposés pour la valeur carbone par le 4^{ème} rapport du GIEC dans un scénario 550 ppm, soit ici le scénario S2. Cette cohérence ne relève cependant pas de l'exploit vu la grandeur des intervalles proposés : 20 à 80\$ par tonne de CO2 en 2030, 30 à 155\$ par tonne de CO2 en 2050.

3.3.2. Différences liées aux structures des modèles

Cet exercice de simulation du CAS a deux avantages pour notre étude : les trois familles de modèles sont représentées (Bottom-Up, Top-Down et hybrides) et la cohérence des scénarii imposée par le CAS permet de mettre en évidence les différences de résultats qui dépendent réellement des structures de ces modèles (voir tableau 9).

Tableau 9. Modèles utilisés par la Commission Quinet

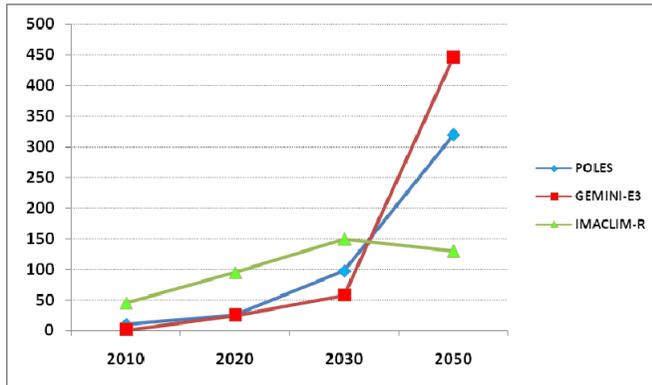
Équipe	Modèle	Famille	Caractéristiques
LEPII	POLES	Modèle d'équilibre partiel du système énergétique	Par région (47), simulation de la demande énergétique, des choix technologiques et de l'équilibre des marchés énergétiques
C-ORDEE & MEDAD	GEMINI E3	Modèle d'équilibre général calculable de l'économie mondiale	Par région (14) et par secteur (18), description des ressources : production (travail, énergie, capital, etc.)/ importations et emplois : consommations, exportations, investissements. Calcul des échanges internationaux de biens et de services et des émissions de GES des activités économiques
CIREC	IMACLIM-R	Modèle d'équilibre général hybride	Description de la croissance comme succession d'équilibres généraux annuels en prix et en quantités physiques (12 régions/12 secteurs), reliés par des modules dynamiques technico-économiques sectoriels (dynamique macroéconomique, évolution des styles de développement, progrès technique). Émissions : CO ₂ .

Source : Centre d'analyse stratégique (2009).

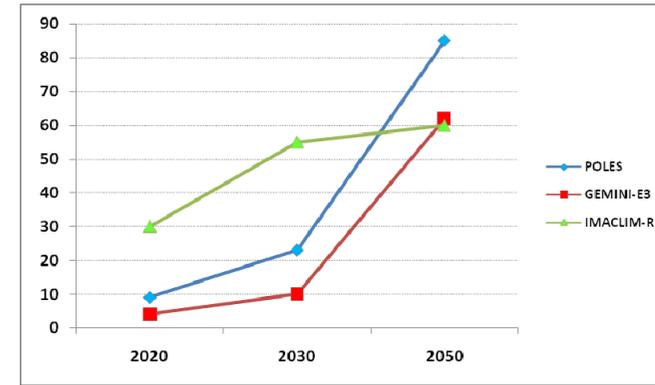
La grande tendance qui se dégage de cet exercice est le contraste entre la croissance exponentielle de la valeur carbone dans GEMINI et POLES et la forme concave du profil d'évolution de cette valeur dans IMACLIM-R, qui reflète la structure caractéristique du modèle du CIREC (graphique 10).

Graphique 10. Profils de valeurs carbone des trois modèles suivant le scénario de contrainte

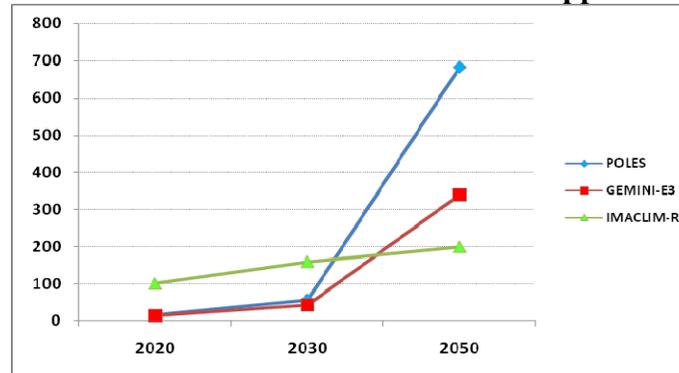
Scénario Europe isolée



Scénario Monde coordonné- 550 ppm



Scénario Monde volontariste – 450 ppm



Source des données : Centre d'analyse stratégique (2009).

Jusqu'en 2030, les trois modèles présentent des taux de croissance similaires de la valeur carbone. La seule différence se situe sur la valeur initiale, le résultat d'IMACLIM étant plus élevé comme nous allons le voir. Au-delà de 2030, les modèles bifurquent :

- POLES et GEMINI-E3 concluent à une croissance de la valeur carbone plus faible que sur la période précédente. Pour ces modèles, la valeur croissante du carbone favorise le développement de nouvelles technologies et de nouvelles infrastructures plus sobres en carbone. Mais cette stimulation reste progressive et les effets de retour favorables de ces technologies et de ces infrastructures sur la valeur carbone restent d'ampleur modeste. Cette ampleur modeste tient à la structure des deux modèles.
Pour GEMINI-E3, les élasticités de substitution constantes qui structurent l'offre technologique entravent la représentation de ruptures techniques fortes et obligent les ajustements à se faire progressivement en fonction des prix des énergies.
Pour POLES, modèle centré sur le secteur énergétique, la réduction de la consommation d'énergie apparaît comme la principale option pour la réduction des émissions de GES comme le rappelle Patrick Criqui dans le rapport final des simulations effectuées pour la Commission Quinet avec POLES. Or du fait de la forte demande en énergie qui caractérise l'économie actuelle, le potentiel des énergies non carbonées, nucléaire et renouvelables (très faiblement émettrices de GES) est quasiment saturé dans le scénario de référence. Leur contribution en volume augmente donc peu lorsque la pression augmente pour la réduction des émissions.
- Pour IMACLIM-R, la valeur croît très fortement dans la période initiale puis cette progression s'affaiblit entre 2030 et 2050 voire s'inverse pour le scénario Europe Unilatérale. Comme décrit dans la première partie, les efforts d'hybridation des modèles se portent à la fois sur la représentation des opportunités technologiques et les éléments dynamiques du modèle comme les anticipations. Cette « courbe en cloche » se fonde sur cette double volonté :
En premier lieu, l'inertie de certaines technologies encapsulées dans des infrastructures productives lourdes et telle que décrite dans les modules techniques d'IMACLIM-R empêche la structure économique de s'adapter automatiquement aux contraintes carbone et impose une valeur de la tonne élevée. Puis, le progrès technique induit, élément fortement développé dans IMACLIM, permet de limiter la hausse (voire d'entamer une baisse) de la valeur du carbone après quelques décennies : les technologies peu carbonées, qui étaient marginales parce que peu rentables en début de période, deviennent progressivement plus rentables, d'abord à cause du prix élevé du carbone, puis grâce aux effets d'apprentissage induits par les investissements cumulés. La pénétration des technologies innovantes se déroule selon trois phases : une phase de recherche et développement pour mettre au point la technologie, une phase de pénétration progressive avec soutien fort pour assurer la rentabilité des innovations, puis une phase de gain autonome de parts de marché grâce à l'apprentissage accumulé, phase dans laquelle le soutien au développement peut être supprimé.

Dans IMACLIM-R, les agents anticipent parfaitement les prix du carbone à 10 ans voire 20 ans pour certains secteurs mais ils sont faiblement sensibles à cette valeur au-delà de cette période. Cette limitation des anticipations sur le court et moyen terme impose également un signal-prix plus fort en début de période pour déclencher des investissements dont la durée de vie dépasse cet horizon.

Les spécificités de chaque modèle permettent ensuite de mettre en évidence certains impacts des contraintes carbone annexes à la mise en place d'une valeur de la tonne : interactions avec les autres secteurs et les autres pays chez GEMINI, évolution de la demande et du mix d'énergie chez POLES, évolution des modes de vie chez IMACLIM. Mais contrairement à la valeur carbone, ces particularités des modèles sont trop éloignées pour pouvoir être comparées.

La commission du CAS sur la valeur tutélaire du carbone nous a offert une occasion unique d'observer comment les différences de structures des modèles se répercutaient dans leur résultat. Mais cet exercice, pour des raisons pratiques que nous allons rappeler, a été restreint à l'approche coût-efficacité. Pour essayer de mettre en évidence les limites de cette approche et surtout pour analyser un autre pilier de la modélisation du changement climatique, nous allons maintenant nous concentrer sur l'approche coût-bénéfice et les difficultés liées à la prise en compte des dommages attendus du changement climatique.

4. LES LIMITES DE L'APPROCHE COÛT-EFFICACITÉ ET LES CHAMPS DE RÉFLEXION POSSIBLES

L'approche coût-efficacité présentée dans les parties 2 et 3 de ce document présente trois atouts majeurs :

- **Elle peut être plus aisément mise en œuvre dans le cadre des modèles existants**, notamment les modèles d'équilibre général calculables, en tirant profit des projections macro-économiques les plus récentes (projections de l'OCDE et scénarios de l'AIE).
- Les objectifs de politique climatique qui servent de fondement à cette approche sont désormais **correctement balisés** : adoption du facteur 4 en France (division par quatre des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050) depuis la loi POPE de 2005, engagements européens de réduction unilatérale de 20% des émissions de GES sur la période 1990-2020 et de réduction de 30% en cas d'accord international datant du printemps 2007. Ces objectifs offrent une cohérence empirique à la modélisation économique.
- Enfin, cette approche est indispensable car des coûts trop élevés **condamneraient** toute politique ambitieuse de réduction des émissions de GES.

Mais présenter les politiques climatiques uniquement sous l'angle des coûts engendrés les dessert et n'offre qu'une aide très partielle à l'action publique. Pour permettre des arbitrages à long terme, ces coûts doivent être comparés aux bénéfices dus à l'évitement des dommages du changement climatique. En outre, négliger les effets rétroactifs de l'environnement sur

l'économie conduit à sous-estimer les efforts nécessaires face au changement climatique. Certaines réponses à ces carences de l'approche coût-efficacité peuvent être trouvées dans l'analyse coût-bénéfice.

4.1. La nécessité de lier les coûts des politiques à l'évitement des dommages créés par le changement climatique

Le rapport Stern publié par le Ministère des Finances britannique le 30 octobre 2006¹⁷ est une étude exhaustive des implications économiques du changement climatique. Ce rapport constitue un des exercices de prospective sur l'effet de serre et d'analyse coût-bénéfice les plus achevés. Cependant il n'a pas échappé à de vives critiques de la part de plusieurs économistes, en particulier nord-américains (W. Nordhaus, R.S.J. Tol, M.L. Weitzman) qui concernent principalement les choix en matière de taux d'actualisation, le traitement de l'incertitude et celui de l'adaptation des générations futures. Ces critiques prouvent que beaucoup reste à faire dans l'expertise économique du changement climatique. Ainsi, l'analyse coût-bénéfice ne peut se passer de choix éthiques discutables dont il faut avoir conscience et que nous détaillerons. Les deux sections suivantes s'appuient sur l'article d'Olivier Godard, « Le rapport Stern sur l'économie du changement climatique était-il une manipulation grossière de la méthodologie économique ? »¹⁸

4.1.1. Un exemple d'analyse coût-bénéfice abouti : le rapport Stern

Le rapport Stern est le fruit d'un travail d'un an et demi réalisé par une quarantaine de chercheurs et propose une approche globale des problématiques climatiques qui le rapproche de la démarche du GIEC. En dépit de l'étendue du travail réalisé, le rapport doit essentiellement sa renommée internationale à deux grands messages.

Le premier est que sans action forte et rapide, le développement économique engendrerait des perturbations dans ce siècle et le suivant d'une ampleur comparable à celles associées aux deux guerres mondiales et à la dépression économique des années 1930. Comme le précise Olivier Godard : « Les dommages actualisés induits par le réchauffement climatique de la planète pourraient représenter 5 à 20% du Produit Mondial Brut (PMB) annuel dès aujourd'hui et pour l'éternité. Il est important de noter que la fourchette mentionnée ne donne pas une indication de l'incertitude concernant le changement climatique mais de l'étendue des phénomènes auxquels on s'intéresse. A 5%, seuls les dommages sur la production et les activités sources de revenu (en particulier l'exploitation de ressources naturelles) sont considérés. L'intégration des pertes de vie humaine et des pertes écologiques fait plus que doubler ce pourcentage. Nous étudierons dans la partie suivante les problèmes éthiques qu'impliquent l'incorporation de ces impacts hors marché. La prise en compte d'hypothèses plus extrêmes sur la sensibilité du climat et sur l'existence de rétroactions climatiques

¹⁷ Voir Stern (2006).

¹⁸ Godard (2007).

positives amplifiant les déséquilibres (moins absorption des GES par les océans, libération de méthane piégé dans les sols gelés...) font passer le coût des dommages à 14%. Enfin, la reconnaissance du fait que les populations les plus pauvres des pays les moins développés seront proportionnellement les plus touchées- plus grande dépendance des conditions naturelles pour satisfaire leurs besoins élémentaires, moindres capacités d'adaptation, situées dans des régions qui seront davantage frappées physiquement- conduit aux 20%. »

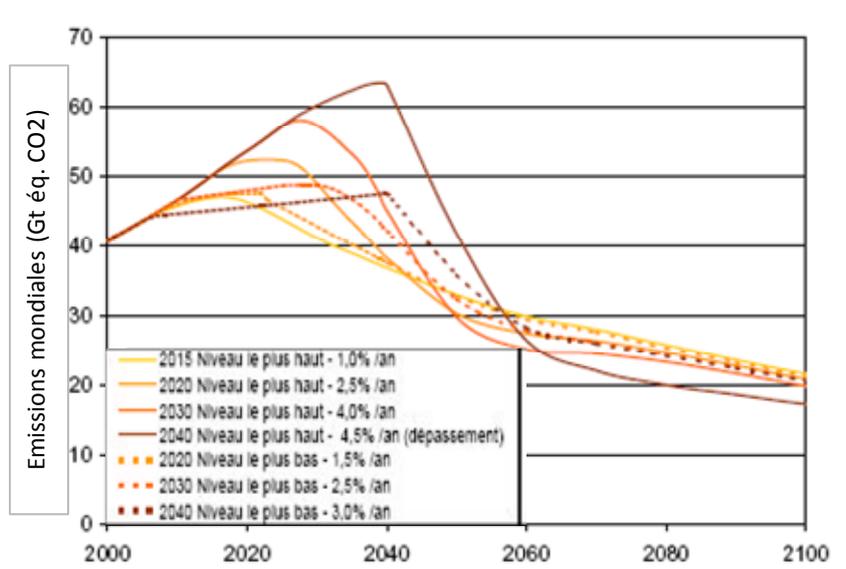
Le capital naturel que constituait le climat de la planète avant le début de l'ère industrielle étant déjà en partie perdu, les dommages qui en résultent doivent être comptabilisés dès maintenant. Mais contrairement au sentiment qui peut être donné par une lecture superficielle de ce premier message (perte de PMB de 5 à 20% « dès aujourd'hui et pour l'éternité »), le profil temporel et géographique des dommages est très contrasté. Selon le rapport Stern, ces dommages seront ressentis pour la plupart à très long terme, surtout au-delà de 2100, mais seront alors extrêmement durables. Ainsi les valeurs centrales des pertes seraient de moins de 1% du PMB en 2050, de 3% en 2100 et de 14% en 2200 dans la combinaison la plus pessimiste retenue par l'équipe de Nicholas Stern. Cet écart temporel entre coûts des politiques de réduction des émissions de GES et bénéfices attendus liés à l'évitement de dommages souligne l'importance du choix du taux d'actualisation dans l'approche coût-bénéfice sur lequel nous reviendrons. Les dommages seront aussi très inégalement répartis selon les régions de la planète. Par exemple, les disparités géographiques existantes de la distribution des pluies seront accentuées. Les zones les plus affectées par une raréfaction de l'eau seront les zones sous-tropicales (zone sahélienne-méditerranéenne, Afrique du Sud) et l'Asie du Sud-est qui pourraient perdre 30% des précipitations en volume si la température s'élevait de 2°C. Au total, les dommages estimés par le rapport Stern pour l'Afrique, le Moyen-Orient, l'Inde et l'Asie du Sud-est seraient plus du double de la moyenne mondiale en pourcentage de PIB à l'horizon 2100.

Le second message est que la prévention du réchauffement climatique peut être obtenue à un coût modéré. Le chiffre issu du rapport Stern souvent évoqué est un coût égal à 1% du PMB par an jusqu'en 2050. Comme il est dit dans Helm (2007), ce chiffre a été d'autant plus abondamment repris par les décideurs politiques que sa modestie ne supposait pas de changements radicaux dans nos comportements économiques. Il est crucial de souligner que dans le rapport Stern, ce coût raisonnable de prévention est fortement lié au respect de certaines conditions essentielles qui sont loin d'être encore réunies :

- L'action politique doit être engagée **sans délai**. Un pic mondial des émissions de GES doit être atteint au plus tard d'ici à 2020 pour avoir des chances sérieuses de stabiliser à long terme la concentration atmosphérique de ces GES à un niveau de 550 ppm (parties par million) en équivalent de CO₂ (CO₂eq). Les émissions devraient ensuite décroître de 2,5% par an alors que la tendance actuelle est à un accroissement de 1,3% par an. Il est important de souligner que 550 ppm n'est pas un scénario de tranquillité climatique mais correspond à une augmentation estimée de la température moyenne de la planète par rapport à l'ère préindustrielle de 3°C. En outre, tout retard dans la mise en œuvre de ces politiques impliquerait à la fois une réduction drastique des chances

d'atteindre l'objectif fixé mais aussi la nécessité ultérieure d'engager dans un délai réduit des actions plus fortes et coûteuses. Ainsi reporter de 2020 à 2030 le pic des émissions planétaires multiplierait par deux le rythme ultérieur de réduction des émissions pour atteindre une stabilisation à 550 ppm. Le graphique 11 illustre l'arbitrage entre précocité et intensité de l'effort de décarbonisation.

Graphique 11. Trajectoires d'émission de GES compatibles avec une stabilisation des concentrations atmosphériques à 550 ppm de CO₂eq (monde)



Source : Rapport Stern, d'après Godard (2007).

- L'action doit être entreprise par la plus grande partie des pays représentant la plus grande part des émissions de GES. Mise en parallèle avec les difficultés actuelles des négociations internationales sur ces thèmes, cette condition paraît particulièrement contraignante.
- L'action politique doit reposer sur deux fondements. D'un côté, il s'agit de faire émerger un prix mondial du carbone, en instaurant un marché international de quotas de GES ou un système de taxation afin de réduire les émissions au moindre coût. L'émergence de ce prix mondial souffre pour l'instant des difficultés de mise en place du protocole de Kyoto. De l'autre côté, il faut mettre en place une politique de stimulation orientée du progrès technique. Selon le rapport Stern, les progrès technologiques attendus devraient diviser par deux les coûts d'abattement moyen d'ici 2025, ce qui repose sur des hypothèses fortes de foi en la technologie comme nous l'avons souligné dans la première partie.

Mais si l'appropriation des principaux messages du rapport Stern par les décideurs politiques s'est souvent faite sans égard pour les conditions requises, de vifs débats méthodologiques sur la structure du rapport ont eu lieu et nous éclairent sur les hypothèses controversées nécessaires à l'approche coût-bénéfice.

4.1.2. Les hypothèses discutables de l'approche coût-bénéfice

Certains économistes, comme William Nordhaus, avaient engagé depuis de nombreuses années des travaux sur l'économie du changement climatique et aboutissaient à des recommandations inverses de celles du rapport Stern quant à l'urgence et à l'intensité de l'effort de prévention à mener. Ces économistes – pour la plupart nord-américains (Nordhaus¹⁹, Tol²⁰, Weitzman²¹, Barret²², Mendelsohn²³, Yohe²⁴) – ont reproché au rapport Stern d'avoir fait un usage sélectif de la littérature économique sur le sujet et d'avoir manipulé les concepts et outils méthodologiques pour parvenir à un tableau alarmiste des dommages.

Mais il nous faut premièrement noter que ce débat n'est pas limité au rapport Stern et s'applique à l'ensemble de l'approche coût-bénéfice (aussi appelée coût-avantage). Reprenons rapidement la thématique de la valeur carbone développée dans la deuxième partie. En termes de coût-bénéfice, la valeur de la tonne de carbone se mesure au regard de l'impact que l'émission de cette tonne supplémentaire aura sur le bien-être des générations futures. On associe donc à une tonne émise de CO₂ aujourd'hui la valeur actuelle d'un dommage futur que l'on cherche à évaluer. Cette valeur carbone est appelée coût social des dommages. Tol (2005) propose une revue de littérature qui montre la dispersion des valeurs obtenues par l'approche coût-avantages. Soulignons que ces valeurs doivent être considérées avec prudence car il est toujours difficile de résumer des études entières à des valeurs particulières, alors qu'elles proposent des fourchettes ou sont associées à différentes hypothèses. Cependant le graphique 12 illustre clairement l'importance des choix de modélisation dans les résultats finals.

¹⁹ Nordhaus (2006).

²⁰ Tol (2006).

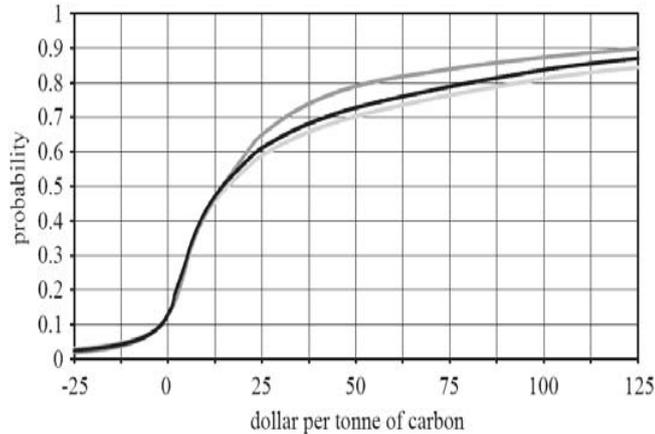
²¹ Weitzman (2007).

²² Barret (2007).

²³ Mendelsohn (2006).

²⁴ Yohe (2006).

Graphique 12. Répartition des différentes valeurs des coûts des dommages dans la littérature économique (dollar par tonne de carbone)



Source: Tol (2005), d'après Centre d'analyse stratégique (2009).

Ces différences et le débat autour du rapport Stern invitent à une vision critique des hypothèses qui encadrent l'analyse coût-bénéfice.

Nous nous concentrerons ici sur les hypothèses qui donnent lieu aux plus vives controverses : la présentation des risques encourus, le taux d'actualisation et les méthodes d'évaluation des impacts notamment ceux hors marché.

Une économie du risque : Malgré les avancées des travaux du GIEC, les conséquences du changement climatique demeurent encore très incertaines, en particulier au niveau régional. On peut traiter ce problème dans le cadre d'une analyse d'utilité espérée qui nécessite d'associer des probabilités aux différentes issues possibles. La définition de ces probabilités se fonde sur des choix subjectifs des modélisateurs. Comme le souligne Azar (2007), une hypothèse cruciale dans cet exercice est l'intégration ou non de ruptures et d'évolutions extrêmes, d'événements à faible probabilité mais aux impacts catastrophiques. Les économistes ne s'accordent pas sur l'importance à donner à ces incertitudes et à leurs coûts. Manne (1996) a compilé pour l'Energy Modeling Forum les travaux liés à ces événements à faible probabilité et en a déduit qu'un petit nombre d'efforts de dépollution à court terme seraient suffisant pour se prémunir contre ces surprises catastrophiques. De nombreux économistes ont reproché au rapport Stern de verser dans le catastrophisme en intégrant des événements extrêmes jugés très incertains même par les travaux du GIEC. Deux précisions sont utiles pour comprendre les choix du rapport Stern. Premièrement, l'expertise du GIEC est soumise à une double revue critique par les pairs et par les scientifiques représentant les gouvernements de toutes les régions, aux intérêts divers et souvent opposés. Les rapports du GIEC doivent donc être compris comme des formulations consensuelles a minima et le rapport Stern, qui n'est pas confronté à cette double exigence, peut intégrer des hypothèses

plus discutables. Secondement, le choix de ne pas s'en tenir à des valeurs moyennes et l'importance donnée aux hypothèses extrêmes doit être compris comme une exigence éthique liée au principe de précaution face à des événements qui mettraient en péril le devenir de l'humanité.

Le taux d'actualisation : il s'agit sûrement du point le plus critiqué du rapport Stern, accusé de manipuler le taux à seule fin d'arriver à la démonstration voulue. La formule canonique du taux d'actualisation, reprise par l'équipe Stern est la suivante :

$$r = \delta + \eta g$$

où δ est le taux de préférence pure pour le présent, η l'élasticité marginale de la consommation par tête et g le taux de croissance de la consommation par tête.

S'agissant de la valeur de la préférence pour le présent, l'équipe Stern propose un argument éthique en conformité avec la philosophie utilitariste initiée par Ramsey en 1928. Elle choisit de fixer δ à un niveau proche de 0 (0,1%) en supposant un principe de traitement égal de l'utilité de chaque génération. La prise en compte des arbitrages d'épargne et de consommation des ménages et notamment le recours important à l'endettement semble remettre en cause cette hypothèse au nom du réalisme économique. Nordhaus mais aussi l'OCDE utilisent une valeur de 3%. Ce choix n'est pas étayé par un argument éthique, si ce n'est qu'on ne peut sacrifier les générations faibles pour des gains faibles mais s'étendant sur un nombre illimité de générations. Mais cette volonté de respect de la réalité économique se heurte au fait que δ ne se livre pas sans ambiguïté. La lecture des indicateurs de marché conduit à des conclusions très opposées, aujourd'hui non réconciliables dans un modèle unique de comportement, ce que souligne Weitzman (2007). D'un côté le taux de rendement réel des placements à long terme les moins risqués est de 1 à 2%. De l'autre côté le rendement des actions peut se situer entre 6 et 8%. Le choix de δ demeure donc de toute manière une hypothèse subjective.

L'équipe Stern choisit un η égal à l'unité, conformément aux hypothèses les plus courantes et pour une fois en accord avec Nordhaus. Avec une élasticité de 1, un dommage brut d'un euro subi par quelqu'un dont le revenu est 100 a un poids en bien-être dix fois plus élevé qu'un dommage de même valeur affectant quelqu'un dont le revenu est 1000, ou bien, dit autrement, une action qui diminuerait à la marge le revenu du riche de 10 mais permettrait de réduire le dommage subi par le pauvre d'au moins 1 améliorerait le bien-être collectif. Certains comme Dasgupta (2006) - par ailleurs en accord avec l'hypothèse éthique sur δ - considèrent cette valeur comme beaucoup trop faible pour tenir compte des inégalités et prône une valeur comprise entre 2 et 4. Si l'on prenait une valeur de 2, il deviendrait légitime de prélever 100 sur les riches si cela permet au groupe dont le revenu est dix fois inférieur de bénéficier d'au moins 1 en plus. Mais d'autres économistes comme Thomas Sterner, considèrent la valeur de 1 comme déjà élevée puisque elle impliquerait des transferts de revenus importants des riches

vers les pauvres qu'on n'observe pas dans l'économie contemporaine. L'évaluation du rapport Stern s'appuie sur des choix qui ne sont pas établis de manière totalement cohérente, en choisissant δ suivant un argument éthique et η suivant l'observation courante de nos économies, contrairement à Dasgupta qui prône des choix normatifs dans les deux cas.

Enfin, le taux de croissance annuel de la consommation par tête retenu dans le rapport Stern est de 1,3 %, soit le scénario du GIEC le plus bas (le scénario le plus « optimiste » étant de 2,8 %). Ce point est essentiel : plus élevée est la richesse anticipée des générations futures, plus faible doivent être les efforts consentis aujourd'hui pour réduire les impacts du changement climatique à long terme.

Pour illustrer les choix méthodologiques qui fondent les travaux sur le taux d'actualisation, le tableau 10 récapitule les valeurs choisies par différents économistes.

Tableau 10. Taux d'actualisation selon divers auteurs

	δ Préférence pour le présent	η Elasticité marginale de la conso	g Croissance conso / tête	r Taux d'actualisation
Rapport Stern (2006)	0,1%	1	1,3%	1,4%
Cline (1992)				1,5%
Weitzman (2007)	2%	2	2%	6%
Nordhaus (DICE)	3%	1	1,5%	4,5%
Dasgupta (2006)	0,1%	2 à 4		
Rapport Lebègue	1%	2	1,5%	4%

Source : Godard (2007).

La dispersion de ces valeurs souligne l'importance des choix de modélisation, éthiques ou descriptifs (même si la limite est parfois ambiguë) qui ont une forte répercussion sur les résultats et dont il faut avoir conscience.

Les méthodes d'évaluation des dommages : cependant même si la question du taux d'actualisation était résolue, ce qui est loin d'être le cas, encore faudrait-il s'interroger sur la valeur des sommes à actualiser. Nous avons vu que la fourchette donnée par Nicholas Stern correspondait à l'étendue des dommages pris en compte dans l'analyse. Les travaux en cours pour valoriser ces dommages soulignent l'insuffisance de l'analyse des impacts dans le domaine marchand : les fonctions de dommages sont dans la plupart des cas indépendantes du rythme des changements climatiques (voir Hallegatte et Théry (2007), les estimations concernant les pays en développement demeurent vagues (Nordhaus et Cline évaluaient les

coûts à l'échelle planétaire en extrapolant simplement les estimations pour les États-Unis). Mais les avancées de la prospective économique permettront sans doute de préciser ce type d'impacts.

En outre, pour estimer les impacts hors domaine marchand, il faut appliquer des méthodes alternatives, très controversées. Pourtant comme le prouve la fourchette de Nicholas Stern, ces impacts représentent une partie très importante des dommages attendus du changement climatique. Des thèmes centraux dans le débat climatique sont difficilement intégrables dans le calcul économique : quel est le coût d'une migration importante ? de la disparition de zones côtières ? Quelle valeur accorder à la biodiversité ? Pour illustrer cette problématique qui touche aux limites de la science économique, nous allons développer l'une des questions concernant les coûts hors marché : quel prix accorder à une vie humaine ?

Certains effets attendus du changement climatique tels qu'explicités par le GIEC pourraient engendrer un bilan lourd en termes de vies humaines : vagues de chaleur, fortes précipitations, tempêtes et ouragans. Intégrer ce coût en vie humaine en le monétisant semble relever de la gageure. Comme le relève Azar (2007), seuls quelques auteurs, comme Ayres et Walter (1991), Fankhauser (1995) et Tol (1995) ont essayé d'explicitier ces coûts. Pour calculer le coût d'une vie ou plus précisément le coût d'une mort, Fankhauser et Tol ont fondé leur analyse sur l'estimation du consentement à payer face à l'augmentation des risques de mortalité. Puisque les pays en développement sont plus pauvres, les sommes que leurs habitants sont prêts à payer pour plus de sécurité sont plus faibles. Ainsi statistiquement, l'étude de Fankhauser concluait que la valeur d'un décès dans un pays riche était quinze fois plus importante que celle d'un décès dans un pays pauvre (Tol parvenait à des conclusions similaires). Ces estimations furent à l'origine de vives critiques, en particulier lorsqu'il est apparu clairement qu'elles serviraient de fondements au chapitre sur les coûts du changement climatique dans le deuxième rapport d'évaluation du GIEC (1996). Outre le malaise évident que peut provoquer l'attribution d'une valeur quinze fois moins importante à une vie dans les pays pauvres, cette façon d'évaluer est une aberration économique car elle ne tient pas compte de l'idée que l'utilité marginale d'un dollar ou d'un euro est bien supérieure dans un pays pauvre que dans un pays riche.

L'introduction de coefficients de pondération des coûts affectant les pays pauvres pour rendre compte de cette différence dans l'utilité marginale de revenu est une tentative pour rétablir une évaluation équitable de tous les pays (Ayres et Walter 1991, Azar et Sterner 1996). L'estimation la plus élevée des dommages du rapport Stern prend d'ailleurs en compte cette approche. Le choix de ces coefficients affecte fortement l'évaluation des dommages et donc la réponse optimale au changement climatique. Néanmoins, ce choix nécessite de construire une fonction de bien-être social, une notion qui, une fois de plus, est fortement dépendante d'hypothèses éthiques dans la modélisation.

Plus fondamentalement, cette volonté de monétiser tous les impacts hors marché pour les intégrer au calcul semble être une limite forte de l'économie du changement climatique. Ces estimations ne sont souvent que la traduction en valeurs de choix éthiques des modélisateurs,

choix difficilement comparables entre eux. La mission interministérielle pilotée par l'ONERC et le MEEDDM sur les impacts du changement climatique, l'adaptation et les coûts associés en France²⁵, qui réalise une analyse coût-bénéfice pour la France, a adopté une démarche moins spectaculaire mais plus raisonnable : celle d'une évaluation des dommages grâce à différentes échelles de valeur. Si les impacts sur le marché sont monétisés, les risques de mortalité ou de morbidité sont exprimés tels quels sans recherche de conversion monétaire.

L'approche coûts/bénéfices suppose que l'on puisse estimer et actualiser les flux de dommages issus du réchauffement climatique à partir d'hypothèses de concentration atmosphérique de gaz à effet de serre et de hausse des températures. Les controverses qui ont entouré la publication du rapport Stern témoignent de la sensibilité des résultats aux différents paramètres retenus. L'approche coût-bénéfice nous a également permis de cerner certaines limites du calcul économique pour analyser le changement climatique. Il est maintenant temps de s'interroger sur un autre fondement de la doxa économique : la croissance.

4.2. La complexité des liens entre croissance économique et environnement

En 1972, le rapport « *The Limits to Growth* »²⁶ issu des travaux du club de Rome (créé en 1968) présente diverses simulations effectuées avec le modèle World et porte un message politiquement radical : si l'on n'arrête pas la croissance économique et démographique globale, l'épuisement des ressources naturelles conduira à un effondrement généralisé de la production, du niveau de vie et de fait, de la population. A la fin des Trente Glorieuses, un certain nombre d'ouvrages appuyaient le rapport du Club de Rome dans son appel à ralentir l'empreinte technologique sur la nature et soulignaient la complexité des liens entre croissance et préservation de l'environnement.

De vives critiques se sont élevées contre *The Limits to Growth*, notamment de la part de William Nordhaus (qui a également, comme on l'a vu, pris par la suite position contre des politiques de protection du climat contraignantes), et ont reproché au rapport de négliger les capacités d'adaptation de l'humanité à cette nouvelle donne écologique. Ce même argument est repris par les contradicteurs du rapport Stern et il est intéressant de le détailler. Nous nous pencherons ensuite sur la difficulté à appréhender les modifications de l'environnement en se limitant aux indicateurs économiques traditionnels et notamment le PIB.

4.2.1. Revue critique des argumentaires fondés sur les stratégies d'adaptation

William Nordhaus s'est insurgé contre la pauvreté de l'analyse des mécanismes économiques du modèle World, qui a structuré *The Limits to Growth*. Sans substitution possible entre matière, travail et capital, World présente selon lui un rapport figé des rapports entre l'homme

²⁵ Voir Groupe de travail interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » (2008).

²⁶ Meadows et al. (1972).

et la nature. Sans mécanismes de prix, les ressources ne sont pas correctement valorisées, ce qui entrave leur préservation. Sans représentation du progrès technique, toute amélioration du processus de production est impossible. Plus fondamentalement, Nordhaus accuse le Club de Rome de proposer une vision apocalyptique de l'avenir en négligeant totalement les capacités d'adaptation de l'homme aux nouvelles données naturelles et ses capacités à façonner son environnement par le progrès technique.

Il faut reconnaître que la structure économique supposée dans le rapport du Club de Rome est extrêmement sommaire. Cependant, le fait que ces critiques sur la prise en compte des stratégies d'adaptation aient également frappé le rapport Stern, exercice beaucoup plus abouti d'un point de vue économique, tend à prouver que le débat ne se situe pas au niveau de la compétence technique mais une fois de plus au niveau du système de valeurs choisi par les modélisateurs. Brian Bloomfield, sociologue des sciences britanniques, a le premier proposé d'appliquer la notion de « cosmologie » à l'étude des entreprises de modélisation, dans le but de saisir comment des croyances partagées peuvent se trouver intégrées dans des équations mathématiques. Quels sont les choix éthiques sous-jacents aux critiques sur la négligence des stratégies d'adaptation qui ont frappé le rapport Stern (et avant lui, *The Limits to Growth*) ? Sont-ils robustes ?

Même si les objectifs de réduction les plus ambitieux sont respectés, un certain changement climatique adviendra. Ainsi, l'objectif de 450 ppm à 2050 correspond à une augmentation de 2°C. Il n'est donc évidemment pas contestable que toute politique de limitation de l'effet de serre doit intégrer des mesures visant à faciliter l'adaptation des personnes, de la production et des sociétés à ce changement. La position de certains économistes, qui voient en l'adaptation un substitut quasi-total à la réduction des émissions de GES par les générations présentes au nom de l'efficacité économique, est en revanche beaucoup plus discutable.

Olivier Godard, dans l'article cité plus haut, propose une critique radicale de ces argumentaires. Richard Tol (2006, 2007) et Scott Barrett (2007) voient dans les stratégies d'adaptation des générations futures un tel facteur d'atténuation des dommages que seules se justifieraient des politiques de prévention très modestes. Les générations futures, beaucoup plus riches, évolueraient dans un monde flexible, où tous les agents s'ajustent aux circonstances et aux opportunités, où l'incertitude ne règne pas et où le progrès technique permet de donner une solution satisfaisante à tous les problèmes. Mais ce monde est réservé au futur car, s'agissant du monde actuel, l'adaptation préventive que demandent les politiques de réduction des émissions de GES est jugée excessivement coûteuse et source de déséquilibres macro-économiques. Cette asymétrie de traitement entre des générations présentes peu adaptables et de riches générations futures qui le seraient infiniment plus repose sur un argument éthique doublement discutable. Premièrement, les capacités d'adaptation des générations futures dépendent fortement des investissements antérieurs orientés vers le traitement du problème climatique. Un retard dans les politiques n'aurait pas seulement pour effet de renforcer les effets attendus du changement climatique (comme le prouve le GIEC) mais laisserait également les générations futures démunies face à ces dommages. Secondement, les générations présentes sont invitées à déterminer leur action en attribuant

aux générations futures un comportement déterminé, jugé optimal de notre point de vue. Cette absence de libre arbitre laisse peu d'espace pour prendre en compte les choix et les erreurs des générations futures ou leur refus pur et simple de ces stratégies d'adaptation que nous avons nous-mêmes refusées. Ce comportement déterministe pourrait s'expliquer par l'obligation absolue des générations futures de s'adapter à un changement climatique à conséquences très importantes mais cet argument poserait alors le problème du fardeau laissé à ces générations au nom de leur flexibilité.

L'argument central de Tol et Barrett, mais aussi de Nordhaus, en faveur d'une prévention limitée est le suivant : une politique ambitieuse de réduction des émissions revient à faire supporter des coûts importants aux générations les moins riches, les générations actuelles. Tout cela au profit de générations futures qui, dans un siècle, seront beaucoup plus riches que les premières. Comme le souligne Olivier Godard, sur la base des hypothèses de croissance retenues par le rapport Stern, la consommation par tête est en effet supposée passer de 7 600 \$ aujourd'hui à 94000 \$ en 2200, soit un ratio de 1 à 12. Quand bien même les dommages climatiques amputeraient 30% du PMB de 2200, les humains vivant à cette époque seraient encore 9 fois plus riches que ceux d'aujourd'hui. Cette hypothèse de croissance annuelle de 1,3% est évidemment pratique pour les calculs du rapport Stern mais elle n'a rien de garanti. Les effets rétroactifs du réchauffement climatique sur la structure économique, a fortiori les effets extrêmes, entraveront sans doute les moteurs de croissance habituels. D'autres raisons géopolitiques ou naturelles peuvent interrompre ce processus de croissance. Or, face à ce sentier sinueux, l'inertie considérable des systèmes climatiques rendra irréversible pour de nombreux siècles les conséquences de l'inaction politique prônée par ces économistes.

Toutes ces interrogations reposent sur des appréciations différentes des rapports entre homme et nature, entre croissance et préservation de l'environnement. Ces divergences sont sans doute renforcées par le fait que les indicateurs économiques attestant la croissance (essentiellement le PIB) peinent à prendre en compte l'environnement dans leur calcul comme nous allons le voir pour conclure.

4.2.2. Les difficultés des indicateurs traditionnels de croissance à appréhender les modifications de l'environnement

Le rapport Stern doit sûrement une partie de son succès à son chiffrage en termes de point de PIB, qui permet de marquer les esprits en utilisant un indicateur connu de tous. De même, la plupart des modèles coût-efficacité proposent une estimation des coûts en pertes de PIB, en ajoutant parfois des coûts de bien-être obtenus à partir de la fonction d'utilité du consommateur représentatif (comme dans GEMINI-E3). Cette évaluation à partir du PIB pose problème car, comme le rappellent certains économistes, le PIB éprouve les plus grandes difficultés à saisir les effets de contraintes environnementales. Le PIB semble victime de son succès : conçu pour rendre compte d'une croissance économique fondée sur l'accumulation du capital, il a été appliqué à des champs comme l'environnement où ses faiblesses ont des effets pervers forts.

Comme le rappellent Gaulier & Kousnetzoff (2006), le milieu naturel remplit trois fonctions indispensables au maintien de la vie en général et à la croissance des activités économiques en particulier : une fonction de réserves de ressources, une fonction de décharge (absorption des déchets par l'eau, la terre et l'air) et une fonction de services d'habitat (air, eau, couche d'ozone ou qualité du climat et biodiversité). Historiquement, la prise de conscience des contraintes qui pesaient sur ces fonctions a d'abord traduit les intérêts directs de propriétaires (épuisement des ressources minérales de certains États, propriétaires privés pour la terre). En revanche, quand les droits de propriété n'existent pas, chacun a tendance à se comporter en passager clandestin en surexploitant une des fonctions naturelles et en négligeant les effets externes de tels comportements. Ces difficultés sont particulièrement importantes pour les biens publics mondiaux comme la qualité du climat et sont renforcées par la mesure du développement économique fondées sur le PIB.

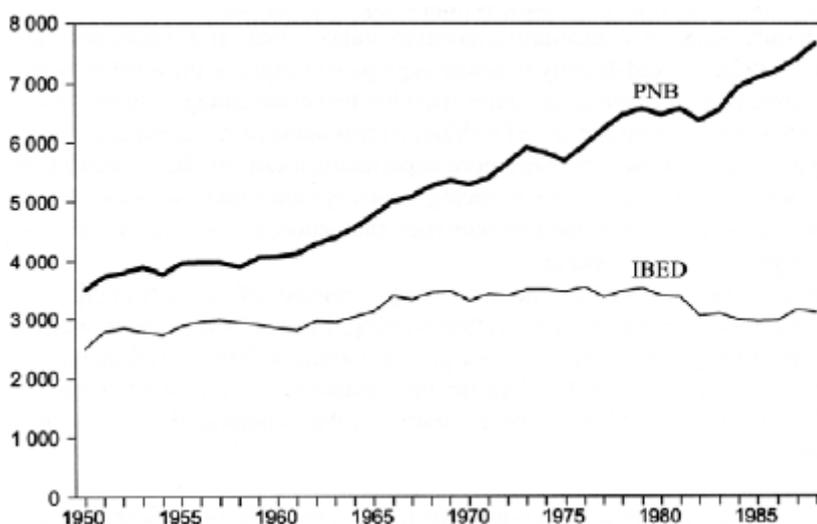
Du point de vue climatique, deux éléments de construction du PIB sont particulièrement problématiques :

- Comme son nom l'indique, le PIB est présenté en données brutes, sans prise en compte de la dépréciation du capital. Un pays qui consommerait la totalité de son capital naturel verrait tout d'abord son PIB fortement augmenter mais entraverait considérablement ses capacités de développement futur. En considérant les ressources naturelles, le climat ou la biodiversité comme parties du stock de capital et en tenant compte de leur dépréciation, les performances de nos économies apparaîtraient radicalement différentes. Helm (2007) souligne qu'une grande partie des ressources utilisées aujourd'hui pour la croissance sont limitées : charbon, pétrole, gaz naturel et ressources halieutiques notamment. Il propose une mesure de la croissance dite soutenable ou durable qui imputerait sur la hausse de la consommation la dépréciation des actifs naturels non renouvelables. Il estime que la croissance impressionnante de la Chine, qui repose sur une exploitation intensive d'énergies fossiles, devrait être réévaluée à un niveau compris entre 2 et 3% par an.
- Le second point critique renvoie au cœur de l'économie publique. Le climat, et plus généralement le stock de capital naturel, est un bien public, considéré comme gratuit. La pollution (externalité négative) n'a pas de prix et n'entraîne donc pas de paiement compensatoire. En présence d'externalités non internalisées, l'équilibre de l'économie ne correspond pas à un optimum de Pareto. Les bénéfices liés à la préservation de l'environnement sont également oubliés : la beauté des paysages, l'existence de la biodiversité ou des ressources naturelles ne sont pas pris en compte si ce n'est par le biais d'activités économiques traditionnelles comme la pêche ou le tourisme. Ces deux défauts se renforcent mutuellement. D'un côté, le manque de valorisation des bénéfices liés à l'environnement conduit à une sous-estimation des actifs naturels. De l'autre côté, le fait de ne pas payer pour la pollution ou les dommages causés nous amène à surexploiter les actifs naturels. Dieter Helm résume ainsi son propos : « Le PIB crée l'illusion de la croissance économique, mais il est inefficace du point de vue environnemental, et il est en particulier associé à un niveau de consommation trop élevé ».

Face aux faiblesses inhérentes au PIB, des indicateurs alternatifs ont été développés par des institutions internationales, des agences environnementales nationales ou des ONG. Leur étude nécessiterait un autre rapport mais on peut en citer quelques uns en utilisant Gaulier & Kousnetzoff (2006). L'institut suédois de l'environnement a mis au point un indice de bien-être durable (IBED²⁷) pour plusieurs pays sur la période 1950-1992. Cet indicateur comprend (i) la consommation des ménages hors dépenses défensives (dans la santé, l'éducation, les transports...) corrigée pour prendre en compte les modifications intervenues dans la distribution des revenus (ii) les dépenses publiques (hors dépenses défensives) (iii) la formation nette de capital productif (iv) les services non marchands fournis par le travail domestique. De cet indice sont déduits (i) les coûts des dégradations de l'environnement (ii) la dépréciation du capital naturel. Une fois de plus, les choix méthodologiques effectués pour bâtir cet indice sont très structurants, mais on peut dégager des tendances lourdes comme l'illustre le graphique 12 sur l'économie américaine.

Graphique 12. PNB et IBED par tête aux Etats-Unis (1950-1988)

(en dollars, prix constants de 1972)



Source : Stockholm Environment Institute (1996), « Sustainable economic welfare in Sweden, a pilot index 1950-1992 », d'après CEPII, *Economie mondiale* 2007.

Le concept d'empreinte écologique développé par Redefining Progress et WWF correspond à une approche différente fondée sur des mesures physiques et non monétaires des effets de l'activité humaine sur l'environnement. En économie de l'environnement, la capacité de charge est le niveau maximum que peut atteindre une population (animale ou végétale) sur une surface donnée. L'empreinte écologique résulte du calcul inverse : c'est la surface nécessaire pour qu'une population puisse satisfaire ses besoins en ressources naturelles et en

²⁷ Stockholm Environment Institute (1996).

absorption de déchets. Pour le changement climatique, l'empreinte prend en compte la surface de forêt nécessaire pour absorber les émissions de GES. L'empreinte est ensuite comparée aux biocapacités productives de la terre pour en déduire si nos comportements sont viables ou pas. En 2001, l'empreinte écologique globale dépassait la biocapacité de 39%. La construction de ces nouveaux indicateurs est une étape importante dans l'appréhension du phénomène de changement climatique.

Les thèmes de l'analyse coût-bénéfice et de la complexité des liens entre croissance et environnement ont ainsi des caractéristiques communes :

- Les méthodes de chiffrage des dommages du changement climatique et la construction de nouveaux indicateurs environnementaux sont récentes et sont loin d'être encore totalement abouties.
- Cependant, ces tentatives sont indispensables pour aider à la compréhension des phénomènes de changement climatique et à leur prise en compte par les décideurs politiques, notamment lors des négociations internationales sur ces thèmes.
- La plupart de ces méthodes restent alternatives et controversées. Les résultats obtenus sont très fortement déterminés par des choix éthiques des modélisateurs. Pour favoriser le débat scientifique et éviter de transformer ces modèles en boîtes noires inaccessibles, il est essentiel que ces hypothèses subjectives soient clairement présentées et assumées.

CONCLUSION

Le but de ce document était de dresser une revue critique des modèles économiques avec effets environnementaux et, plus largement, des problématiques traitant du changement climatique. En effet, les divergences des évaluations des coûts des dommages dus au changement climatique et des politiques d'atténuation s'expliquent en partie par les structures des modèles. De fait, peu de modèles utilisent une approche coût-bénéfice des politiques climatiques, qui supposent une évaluation économique des dommages, et la plupart se contentent d'une approche coût-efficacité, c'est-à-dire qu'ils comparent les politiques de réduction d'émissions de gaz à effet de serre en fonction de leurs coûts.

Les modèles coûts-efficacité se divisent en trois grandes familles : Top-Down, Bottom-Up et hybrides. Les modèles Bottom-Up permettent de décrire très précisément les technologies du secteur énergétique et de simuler des trajectoires du progrès technique du point de vue de l'ingénieur. Mais ils reproduisent mal les effets en retour du secteur énergétique sur le reste de l'économie, car leur description microéconomique des producteurs et des consommateurs manque de réalisme, et ils ignorent les effets des modifications du secteur de l'énergie sur la structure de l'économie, la productivité ou le commerce international. Leur approche d'ingénieur tendrait à sous-estimer les coûts des réductions, mais la rigidité supposée de l'économie amène au contraire à les surestimer.

A l'inverse, les modèles Top-Down, qui ont une représentation microéconomique et macroéconomique fines de l'ensemble des secteurs, peuvent évaluer les impacts des politiques de réduction d'émissions sur le PIB et le bien-être. Mais leurs fonctions de production ne permettent pas de prendre pleinement en compte les potentiels de progrès technique, en particulier dans le secteur énergétique, ce qui risque de surestimer les coûts des politiques climatiques.

Le traitement des politiques climatiques nécessite des horizons de temps très longs. Qu'ils soient Bottom-Up ou Top-Down, pour ne pas alourdir excessivement les calculs, la plupart des modèles fonctionnent en dynamique récursive et non en optimisation inter-temporelle, et en conséquence ne modélisent pas les anticipations de long terme des agents. Ils ne peuvent donc pas prendre en compte l'effet d'annonce de mesures programmées à une date ultérieure, qui pourtant devraient entraîner des investissements en fonction des transformations anticipées des prix, et diminuer ainsi les coûts d'abattement. Les modèles récursifs se contentent de scénarios exploratoires, alors que les modèles d'optimisation peuvent produire des scénarios normatifs. C'est parmi ces derniers que l'on trouve des modèles avec une approche coûts-bénéfices, les modèles intégrés de contrôle optimal, qui permettent des arbitrages inter-temporels entre coûts de réduction et coûts des dommages. Cependant certains d'entre eux supposent l'apparition future de technologies backstop, ce qui diminue considérablement le coût des dommages.

L'hybridation entre modèles des différentes familles tente de compenser les lacunes des uns et des autres. Partant d'un modèle portant sur l'ensemble de l'économie, on essaiera de renforcer son contenu technique, mais aussi de construire un scénario de référence réaliste. Les enjeux consistent à obtenir une architecture cohérente entre le système énergétique et le reste de l'économie, et à pouvoir intégrer aisément les découvertes récentes portant sur le potentiel technique et sa mise en œuvre (effet rebond, etc.). Ainsi le modèle hybride IMACLIM-R tente de faire coexister des rigidités de court terme et une flexibilité de long terme dans les possibilités d'adaptation structurelle. Son architecture mêle un modèle d'équilibre général calculable et des modules techniques détaillés en unités physiques, et les trajectoires macroéconomiques de ses scénarios sont endogénéisées. Cependant l'interprétation des résultats est difficile.

L'étude d'un cas pratique – la détermination de la valeur économique du carbone, représentant ici le coût d'abattement des GES, menée par la Commission Quinet – nous a permis d'illustrer l'impact des différences de structures sur les résultats de trois modèles : GEMINI-E3 (Top-Down), POLES (Bottom-Up) et IMACLIM-R (hybride). Alors qu'à un horizon de moyen-long terme (2010-2030), la croissance du prix du carbone simulée par les trois modèles est similaire, à très long terme (2030-2050) le modèle IMACLIM-R se distingue par une forte baisse de cette croissance, contrairement aux modèles GEMINI-E3 et POLES. La stabilisation après 2030 du coût d'abattement dans IMACLIM-R est obtenue grâce à la représentation du progrès technique induit. Dans GEMINI-E3 le coût de l'effort d'abattement augmente uniformément car les élasticités de substitution de la fonction de production sont constantes. Dans POLES la croissance du coût d'abattement ne diminue pas dans les

scénarios à forte contrainte car la réduction porte sur la consommation d'énergie, le potentiel d'énergies non carbonées étant déjà quasiment saturé dans le scénario de référence.

Contrairement aux approches précédentes, le Rapport Stern est un exemple d'analyse coût-bénéfice du changement climatique. Les résultats d'un tel exercice sont soumis à trois types d'incertitudes : la connaissance incomplète des risques de dommages, le choix d'un taux d'actualisation pour valoriser le décalage temporel entre les politiques préventives et leurs effets, et enfin les méthodes d'estimation « alternatives » des impacts du changement climatique hors domaine marchand. Les difficultés de la modélisation des impacts économiques du changement climatique traduisent la complexité des liens entre croissance économique et environnement. L'extrapolation à long terme de la croissance aussi bien du revenu par tête que du progrès technique amène certains économistes à repousser indéfiniment les politiques de protection de l'environnement. De nouveaux indicateurs de croissance, intégrant la dépréciation du capital et attribuant un prix de référence aux biens publics mondiaux, sont nécessaires pour que les exercices de modélisation servent mieux la prise de décision politique.

BIBLIOGRAPHIE

AYRES R. & WALTER J. (1991), « The Greenhouse Effect : Damages, Costs and Abatement », *Environmental and Resource Economics*, 1, 237-270.

AZAR C. (2007), « Les émissions optimales de CO2 le sont-elles vraiment? », dans « Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques », sous la direction de Amy Dahan Dalmedico, collection Recherches, La Découverte.

AZAR C. & STERNER T. (1996), « Discounting and distributional considerations in the context of climate change », *Ecological Economics*, 19, 169-185.

BARRET S. (2007), « Who Should Foot the Bill on Climate Change? », *Yale Global*, 2 mars.

BERNARD A., DROUET L. & VIELLE M. (2008), « GEMINI-E3, A General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy, Energy and the Environment », V5.3.

BERNARD A. & VIELLE M. (2008a), « Résultats des simulations réalisées avec le modèle GEMINI-E3 pour la Commission du CAS chargée de la détermination de la Valeur Carbone », 21 Avril, mimeo.

BERNARD A. & VIELLE M. (2008b), « Le Modèle GEMINI-E3 », présentation au CEPII, 5 juin.

BÖHRINGER C. & RUTHERFORD T. F. (2002). « Carbon Abatement and International Spillovers » *Environmental and Resource Economics*, Vol. XXII, pp. 391-417.

Centre d'analyse stratégique (2009), « La valeur tutélaire du carbone », Rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Rapports et documents N°16-2009.

CRASSOUS R., SASSI O., HOURCADE J.-C., WAISMAN H., GUIVARCH C. & GITZ V. (2006), « IMACLIM-R, a modeling framework for sustainable development issues », CIRED, mimeo, octobre.

CRASSOUS R., SASSI O., HOURCADE J.-C., GUIVARCH C., WAISMAN H. & HENRY N. (2008), « Le modèle IMACLIM-R », CIRED, présentation au CEPII, 15 mai.

DASGUPTA P. (2006), « Comments on the Stern Review's Economics of Climate Change », University of Cambridge (UK), 12 Décembre.

DE VRIES B.J.M., VAN VUUREN D. P., DEN ELZEN M.G.J. & JANSSEN M.A. (2001), "The Targets Image Energy Regional (TIMER) Model, Technical Documentation », RIVM report 461502024 2001, November.

FANKHAUSER S. (1995), "Valuing Climate Change: the Economics of the Greenhouse". Earthscan, Londres.

GAULIER G. & KOUSNETZOFF N. (2006), "La mesure des liens entre environnement et croissance », chapitre 7, CEPII. L'économie mondiale 2007, Repères, La Découverte.

GHERSI F. & HOURCADE, J.-C. (2006), "Macroeconomic consistency Issues in E3 Modeling: The Continued fable of the Elephant and the Rabbit", *The Energy journal*, Hybrid modeling of Energy-Environment policies: Reconciling Bottom-up and Top-down, 39-61.

GODARD O. (2007), "Le Rapport Stern sur l'économie du changement climatique était-il une manipulation grossière de la méthodologie économique ?", *Revue d'économie politique*, **117** (4), juillet-août, pp. 475-506.

GOULDER L. (1995), "Environmental Taxation and the Double Dividend: A Reader's Guide", *International Tax and Public Finance*, 2:157-183.

Groupe de travail interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France » (2008), Document d'étape, Paris, juin 2008. <http://www.onerc.gouv.fr>

GRUBB M., EDMONDS J., BRINK P.T. & MORRISON M. (1993), "The Costs of Limiting Fossil-Fuel CO2 Emissions: A Survey and Analysis", *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol. 18: 397-478 November

HALLEGATTE S. & THERY D. (2007) « Les impacts économiques futurs du changement climatique sont-ils sous-estimés ? », *Revue d'économie politique*, Volume 117 2007/4.

HELM D. (2007), "Climate change: sustainable growth, markets, and institutions", Paper for the UN Human Development Report 2007, April.

HOURCADE J.-C., JACCARD M., BATAILLE C. & GHERSI F. (2006), "Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges", *Energy Journal*, Special Issue n°2, 1-11.

KUROSAWA A. (1999), "Analysis of Carbon Emission Stabilization Targets and Adaptation by Integrated Assessment Model", *Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp.157-175.

LEPII (2006), "The POLES model, POLES State of the Art", LEPII-EPE, CNRS-Grenoble, janvier.

MANNE A., MENDELSON R. & RICHELSON R. (1995), "MERGE. A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies", *Energy policy*, vol. 23, n°1, pp. 17-34.

- MANNE A. & SCHRATTENHOLZER L. (1996), International Energy Workshop January 1996 Poll Edition. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- McKIBBIN W.J. & WILCOXEN P.J. (1998), "The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model," *Economic Modelling*, Elsevier, vol. 16(1), pages 123-148, January.
- MEADOWS D.H, MEADOWS D.L., RANDERS J. & BEHRENS W.W.III (1972), « The Limits to Growth », Potomac Associates.
- MENDELSON R. (2006), "A Critique of the Stern Report", *Regulation*, Winter 2006-2007.
- MESSNER S. & STRUBEGGER M. (1995), "User's Guide for MESSAGE III", International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, WP-95-69.
- MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change (2009), "Economics, Emissions, and Policy Cost - The EPPA Model" <http://globalchange.mit.edu/igsm/eppa.html>
- NORDHAUS W. (2006), "The Stern Review on the Economics of Climate Change", Yale University, 17 novembre.
- OCDE (2008), "Introduction to the ENV-Linkages Model", ENV/EPOC/GSP/RD(2008)3.
- OTTO V., LÖSCHEL A. & REILLY J. (2006), "Directed Technical Change and Climate Policy", MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No. 134.
- PALTSEV S., REILLY J.M., JACOBY H.D., ECKAUS R.S.,McFARLAND J., SAROFIM M., ASADOORIAN M. & BABIKER M. (2005), "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4", MIT Joint Program on the Science and Policy of Global, Report N°125, August.
- PONCET S. (2006), "The Long Term Growth Prospects of the World Economy: Horizon 2050", CEPII Working Paper, n° 2006-16, octobre.
- STERN N. (2006), « The Economics of Climate Change, The Stern Review », Cambridge University Press, 2006.
- Stockholm Environment Institute (1996), « Sustainable economic welfare in Sweden, a pilot index 1950-1992 ».
- TOL R.S.J. (1995), « The damage cost of climate change: toward more comprehensive calculations », *Environmental and Resource Economics*, 5, 353-374.
- TOL R.S.J. (2005), "The marginal Damages costs of Carbon dioxide emissions : an assessment of the uncertainties", *Energy Policy* (33).

TOL R.S.J. (2006), "The Stern review of the economics of climate change: a comment", 30 octobre.

TOL R.S.J. (2007), "Europe's long-term climate target: a critical evaluation", *Energy Policy*, 35: 424-432.

WEITZMAN M.L.(2007), "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change," *Journal of Economic Literature*, American Economic Association, vol. 45(3), pages 703-724, September.

YOHE G. (2006), "Some thoughts on the damage estimates presented in the Stern Review – A Editorial", *The Integrated Assessment Journal*, 6(3): 65-72.

LISTE DES DOCUMENTS DE TRAVAIL DU CEPII

Une liste complète est disponible sur le site du CEPII : www.cepii.fr.
 Pour recevoir un message d'alerte, contacter Sylvie Hurion (sylvie.hurion@cepii.fr).

<i>N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Auteurs</i>
2009-35	Trade, Foreign Inputs and Firms' Decisions: Theory and Evidence	M. Bas
2009-34	Export Sophistication and Economic Performance: evidence from Chinese provinces	J. Jarreau & S. Poncet
2009-33	Assessing the Sustainability of Credit Growth: The Case of Central and Eastern European Countries	V. Coudert & C. Pouvelle
2009-32	How do different exporters react to exchange rate changes? Theory, empirics and aggregate implications	N. Berman, P. Martin & Thierry Mayer
2009-31	Spillovers from Multinationals to Heterogeneous Domestic Firms: Evidence from Hungary	G. Békés, J. Kleinert & F. Toubal
2009-30	Ethnic Networks, Information, and International Trade: Revisiting the Evidence	G. J. Felbermayr, B. Jung & F. Toubal
2009-29	Financial Constraints in China : Firm-level Evidence	S. Poncet, W. Steingress & H. Vandenbussche
2009-28	The Crisis: Policy Lessons and Policy Challenges	A. Bénassy-Quéré, B. Coeuré, P. Jacquet & J. Pisani-Ferry
2009-27	Commerce et flux financiers internationaux : MIRAGE-D	A. Lemelin
2009-26	Oil Prices, Geography and Endogenous Regionalism: Too Much Ado about (Almost) Nothing	D. Mirza & H. Zitouna
2009-25	EU15 Trade with Emerging Economies and Rentier States: Leveraging Geography	G. Gaulier, F. Lemoine & D. Ünal
2009-24	Market Potential and Development	T. Mayer
2009-23	Immigration, Income and Productivity of Host Countries: A Channel Accounting Approach	A. Mariya & A. Tritah
2009-22	A Picture of Tariff Protection Across the World in 2004 MAcMap-HS6, Version 2	H. Boumellassa, D. Laborde Debucquet & C. Mitaritonna
2009-21	Spatial Price Discrimination in International Markets	J. Martin

<i>N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Auteurs</i>
2009-20	Is Russia Sick with the Dutch Disease	V. Dobrynskaya & E. Turkish
2009-19	Économies d'agglomération à l'exportation et difficulté d'accès aux marchés	P. Koenig, F. Mayneris & S. Poncet
2009-18	Local Export Spillovers in France	P. Koenig, F. Mayneris & S. Poncet
2009-17	Currency Misalignments and Growth: A New Look using Nonlinear Panel Data Methods,	S. Béreau, A. López Villavicencio & V. Mignon
2009-16	Trade Impact of European Measures on GMOs Condemned by the WTO Panel	A. C. Disdier & L. Fontagné
2009-15	Economic Crisis and Global Supply Chains	A. Bénassy-Quéré, Y. Decreux, L. Fontagné & D. Khoudour-Casteras
2009-14	Quality Sorting and Trade: Firm-level Evidence for French Wine	M. Crozet, K. Head & T. Mayer
2009-13	New Evidence on the Effectiveness of Europe's Fiscal Restrictions	M. Poplawski Ribeiro
2009-12	Remittances, Capital Flows and Financial Development during the Mass Migration Period, 1870-1913	R. Esteves & D. Khoudour-Castéras
2009-11	Evolution of EU and its Member States' Competitiveness in International Trade	L. Curran & S. Zignago
2009-10	Exchange-Rate Misalignments in Duopoly: The Case of Airbus and Boeing	A. Bénassy-Quéré, L. Fontagné & H. Raff
2009-09	Market Positioning of Varieties in World Trade: Is Latin America Losing out on Asia?	N. Mulder, R. Paillacar & S. Zignago
2009-08	The Dollar in the Turmoil	A Bénassy-Quéré, S. Béreau & V. Mignon
2009-07	Term of Trade Shocks in a Monetary Union: An Application to West-Africa	L. Batté, A. Bénassy-Quéré, B. Carton & G. Dufrénot
2009-06	Macroeconomic Consequences of Global Endogenous Migration: A General Equilibrium Analysis	V. Borgy, X. Chojnicki, G. Le Garrec & C. Schwellnus
2009-05	Équivalence entre taxation et permis d'émission échangeables	P. Villa
2009-04	The Trade-Growth Nexus in the Developing Countries: a Quantile Regression Approach	G. Dufrénot, V. Mignon & C. Tsangarides

<i>N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Auteurs</i>
2009-03	Price Convergence in the European Union: within Firms or Composition of Firms?	I. Méjean & C. Schwellnus
2009-02	Productivité du travail : les divergences entre pays développés sont-elles durables ?	C. Bosquet & M. Fouquin
2009-01	From Various Degrees of Trade to Various Degrees of Financial Integration: What Do Interest Rates Have to Say	A. Bachellerie, J. Héricourt & V. Mignon
2008-32	Do Terms of Trade Drive Real Exchange Rates? Comparing Oil and Commodity Currencies	V. Coudert, C. Couharde & V. Mignon
2008-31	Vietnam's Accession to the WTO: Ex-Post Evaluation in a Dynamic Perspective	H. Boumellassa & H. Valin
2008-30	Structural Gravity Equations with Intensive and Extensive Margins	M. Crozet & P. Koenig
2008-29	Trade Prices and the Euro	J. Martin & I. Méjean
2008-28	Commerce international et transports : tendances du passé et prospective 2020	C. Gouel, N. Kousnetzoff & H. Salman
2008-27	The Erosion of Colonial Trade Linkages after Independence	T. Mayer, K. Head & J. Ries
2008-26	Plus grandes, plus fortes, plus loin... Performances relatives des firmes exportatrices françaises	M. Crozet, I. Méjean & S. Zignago
2008-25	A General Equilibrium Evaluation of the Sustainability of the New Pension Reforms in Italy	R. Magnani
2008-24	The Location of Japanese MNC Affiliates: Agglomeration, Spillovers and Firm Heterogeneity	T. Inui, T. Matsuura & S. Poncet
2008-23	Non Linear Adjustment of the Real Exchange Rate Towards its Equilibrium Values	S. Béreau, A. Lopez Villavicencio & V. Mignon
2008-22	Demographic Uncertainty in Europe – Implications on Macro Economic Trends and Pension Reforms – An Investigation with the INGENUE2 Model	M. Aglietta & V. Borge
2008-21	The Euro Effects on the Firm and Product-Level Trade Margins: Evidence from France	A. Berthou & L. Fontagné
2008-20	The Impact of Economic Geography on Wages: Disentangling the Channels of Influence	L. Hering & S. Poncet
2008-19	Do Corporate Taxes Reduce Productivity and Investment at the Firm Level? Cross-Country Evidence from the Amadeus Dataset	J. Arnold & C. Schwellnus

<i>N°</i>	<i>Titre</i>	<i>Auteurs</i>
2008-18	Choosing Sensitive Agricultural Products in Trade Negotiations	S. Jean, D. Laborde & W. Martin
2008-17	Government Consumption Volatility and Country Size	D. Furceri & M. Poplawski Ribeiro
2008-16	Inherited or Earned? Performance of Foreign Banks in Central and Eastern Europe	O. Havrylchuk & E. Jurzyk
2008-15	The Effect of Foreign Bank Entry on the Cost of Credit in Transition Economies. Which Borrowers Benefit most?	H. Degryse, O. Havrylchuk, E. Jurzyk & S. Kozak
2008-14	Contagion in the Credit Default Swap Market: the Case of the GM and Ford Crisis in 2005.	V. Coudert & M. Gex
2008-13	Exporting to Insecure Markets: A Firm-Level Analysis	M. Crozet, P. Koenig & V. Rebeyrol
2008-12	Social Competition and Firms' Location Choices	V. Delbecque, I. Méjean & L. Patureau
2008-11	Border Effects of Brazilian States	M. Daumal & S. Zignago
2008-10	International Trade Price Indices	G. Gaulier, J. Martin, I. Méjean & S. Zignago
2008-09	Base de données CHELEM – Commerce international du CEPII	A. de Saint Vaulry
2008-08	The Brain Drain between Knowledge Based Economies: the European Human Capital Outflows to the US	A. Tritah
2008-07	Currency Misalignments and Exchange Rate Regimes in Emerging and Developing Countries	V. Coudert & C. Couharde
2008-06	The Euro and the Intensive and Extensive Margins of Trade: Evidence from French Firm Level Data	A. Berthou & L. Fontagné
2008-05	On the Influence of Oil Prices on Economic Activity and other Macroeconomic and Financial Variables	F. Lescaroux & V. Mignon
2008-04	An Impact Study of the EU-ACP Economic Partnership Agreements (EPAs) in the Six ACP Regions	L. Fontagné, D. Laborde & C. Mitaritonna
2008-03	The Brave New World of Cross-Regionalism	A. Tovias
2008-02	Equilibrium Exchange Rates: a Guidebook for the Euro-Dollar Rate	A. Bénassy-Quéré, S. Béreau & V. Mignon
2008-01	How Robust are Estimated Equilibrium Exchange Rates? A Panel BEER Approach	A. Bénassy-Quéré, S. Béreau & V. Mignon

Organisme public d'étude et de recherche en économie internationale, le CEPII est placé auprès du Centre d'Analyse Stratégique. Son programme de travail est fixé par un conseil composé de responsables de l'administration et de personnalités issues des entreprises, des organisations syndicales et de l'Université.

Les *documents de travail* du CEPII mettent à disposition du public professionnel des travaux effectués au CEPII, dans leur phase d'élaboration et de discussion avant publication définitive. Les *documents de travail* sont publiés sous la responsabilité de la direction du CEPII et n'engagent ni le conseil du Centre, ni le Centre d'Analyse Stratégique. Les opinions qui y sont exprimées sont celles des auteurs.

Les *documents de travail* du CEPII sont disponibles sur le site : <http://www.cepii.fr>.

CEPII

9, RUE GEORGES PITARD, 75740 PARIS CEDEX 15

SYLVIE HURION – PUBLICATIONS

TÉL : 01 53 68 55 14 - FAX : 01 53 68 55 04

sylvie.hurion@cepii.fr

ISSN : 1293-2574