



HAL
open science

Comment intégrer l'économie, l'énergie et le climat ?

Minh Ha-Duong, Pierre Matarasso

► **To cite this version:**

Minh Ha-Duong, Pierre Matarasso. Comment intégrer l'économie, l'énergie et le climat ?. Dossier Pour la Science 52, 2006, pp.92-97. <halshs-00078623v2>

HAL Id: halshs-00078623

<https://shs.hal.science/halshs-00078623v2>

Submitted on 3 Jul 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Comment intégrer l'économie, l'énergie et le climat ?

Minh Ha-Duong¹, Pierre Matarasso¹

Juin 2006

Des modélisations ont l'ambition d'intégrer à l'économie globale les effets des activités humaines sur le climat et réciproquement.

Si la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0.6°C (+/- 0.2°C) au cours du siècle dernier, c'est en grande partie à cause de la pollution causée par les émissions humaines de gaz à effet de serre: depuis 1750, la quantité de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 31% (+0.4% par an actuellement) et le méthane de 151%, sans parler des hydrocarbures halogénés (les CFCs et leurs substituts, qui sont de très puissants gaz à effet de serre en plus de nuire à la couche d'ozone).

Le changement climatique soulève un grand nombre de questions qui dépassent les frontières traditionnelles entre les disciplines scientifiques. Les plus urgentes tournent autour du problème de la précaution: que faut-il faire face aux incertitudes profondes sur ce que nous réserve l'avenir ? Est-il temps de réduire les voyages en avion, de définir de nouvelles formes de mobilité dans les villes, d'améliorer l'efficacité énergétique des activités humaines ou encore de trouver de nouvelles sources d'énergies (nucléaires, renouvelables, charbon avec capture et séquestration du CO₂)? Combien de temps pouvons-nous laisser aller les choses sans rien modifier de nos pratiques ?

Compte tenu des dynamiques de développement économique actuelles et attendues sur les trente prochaines années, les émissions ne diminueront pas rapidement. Cela suggère qu'il vaut mieux s'y prendre tôt, car quand on détectera un changement abrupt et irréversible du climat, il sera peut-être trop tard. Comment atteindre l'objectif de la France de diviser ses émissions de gaz à effet de serre par quatre d'ici 2050 comme notre pays s'y est engagé?

Les modèles « intégrés » économie-énergie-climat sont des modèles numériques interdisciplinaires destinés à étudier ces questions d'impact, d'adaptation et de réduction du changement climatique. Ils visent à traduire les débats qualitatifs sur la précaution en faisceaux d'arguments logiquement organisés, basés sur des connaissances scientifiques mesurables, pour informer les citoyens et les instances de décision nationales et internationales. Ils sont le socle d'une accumulation de connaissances qui nous permettront d'explorer une vaste gamme de situations possibles et de nous préparer ainsi à de nombreuses éventualités, tant du côté des évolutions climatiques que de celui des manières de réduire les émissions anthropiques.

Le couplage des modèles

Chaque discipline apporte des connaissances sur une part des processus qui déterminent l'évolution du système Terre - Société, mais leur mise en interaction n'est pas triviale. Par exemple, les Modèles de Circulation Générale des climatologues, qui ont confirmé l'alerte à propos du changement climatique, sont insuffisants pour étudier les stratégies de réduction d'émissions. Il faut alors se pencher sur les technologies de production et de transformation de l'énergie mais aussi celles de production de biens et services. Celles-ci doivent être insérées dans les grands équilibres monétaires et financiers qui régulent l'économie: les possibilités d'investissement, les budgets des ménages, les prix et échanges internationaux et les mouvements de capitaux.

1 Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, CIRED, CNRS/EHESS

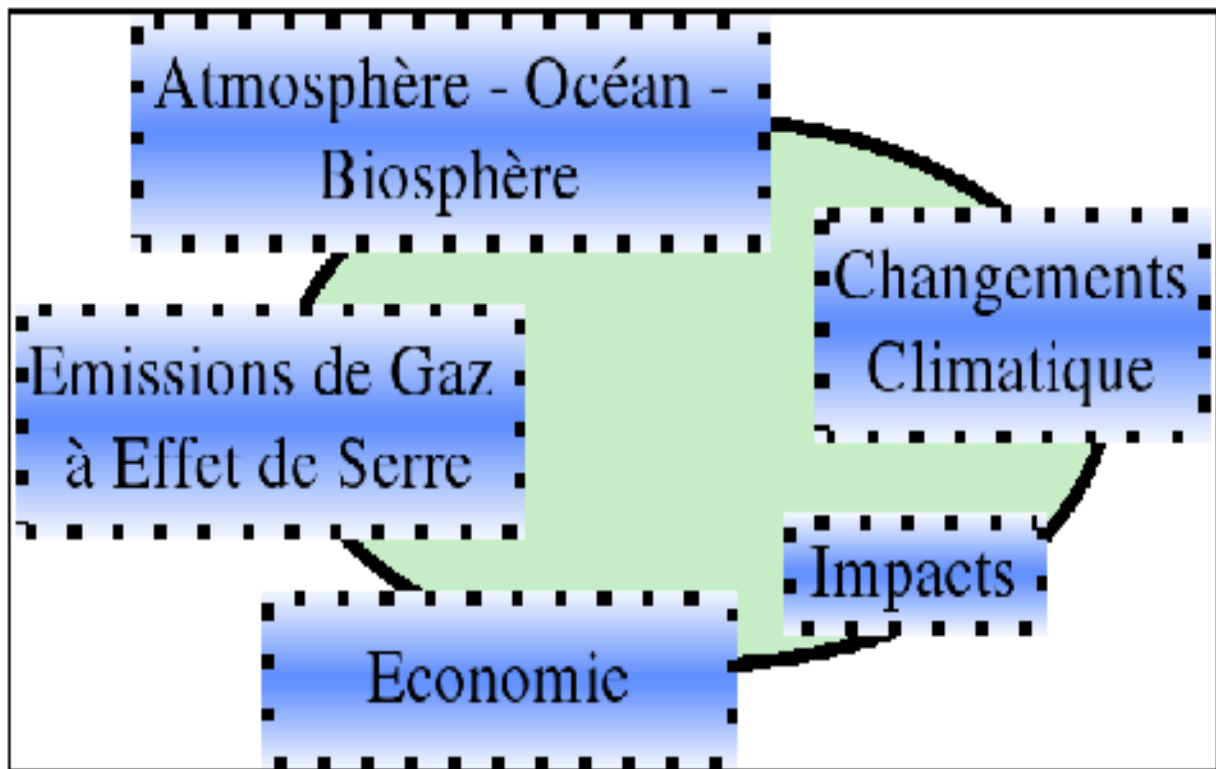


Illustration 1: Composants typiques d'un modèle intégré du changement climatique (source IPCC)

De surcroît, toute la planète est concernée. Il faut comprendre les interactions de la physique planétaire et de la chimie atmosphérique en même temps que la dépendance du climat vis à vis des activités humaines et plus généralement de la vie terrestre.

Le phénomène du changement climatique influence et est influencé par des processus multiples à toutes échelles spatiales et temporelles. Seul un Dieu Créateur (s'il existe) pourrait être crédité d'une telle connaissance. On pourrait questionner une telle entreprise de recherche du fait que les recherches totalisantes (holisme) ont eu jusqu'ici bien peu de traductions scientifiques.

Mais il n'est pas nécessaire de prétendre prédire l'avenir dans sa globalité pour apporter des éléments de réponse scientifiques à un problème, fut-il global. La décision publique en matière de politique énergétique est informée par les voix de divers corps sociaux. Les scientifiques ont la responsabilité d'établir une démarche

cognitive d'accumulation et d'organisation des connaissances pour faire face aux modifications que nous apportons au système planétaire. En dépit de la difficulté il faut tenter de hiérarchiser les phénomènes, les causalités (en particulier les rétroactions positives ou négatives susceptibles de renforcer ou d'atténuer les dynamiques) et d'enclencher une démarche cognitive permettant l'échange d'arguments et leur hiérarchisation sur les réponses à donner.

Face à la complexité du système, les chercheurs réalisant un modèle intégré choisissent en général une approche cartésienne, c'est à dire modulaire, basée sur le couplage de modèles existants définis en général par un découpage disciplinaire. On reconnaît généralement la division suivante (voir l'illustration 1):

- Des modèles du climat (qui peuvent intégrer eux-mêmes la circulation générale de l'atmosphère, de l'océan ainsi que les calottes glaciaires)

- Des modèles de l'activité macro-économique mondiale à long terme ;
- Des modèles des systèmes énergétiques ;
- Des modèles du cycle du carbone qui dépendent de l'usage des sols (et sont de plus en plus couplés aux modèles de « circulation générale de l'atmosphère », les GCM)

Ces différents modules fonctionnent à partir de paramètres provenant les uns des autres. Par exemple, la circulation atmosphérique dépend de la composition de l'atmosphère qui est liée à l'activité économique et aux systèmes énergétiques par l'intermédiaire des émissions. La rugosité à la surface dépend de l'usage des sols.

L'activité économique est affectée par les développements dans le secteur de l'énergie mais aussi par les impacts (en bien ou en mal) du changement climatique.

Les systèmes énergétiques dépendent de l'épuisement des ressources fossiles, des volontés de limiter les émissions mais aussi du climat (chauffage, climatisation).

Le cycle du carbone intervient sur le climat mais dépend aussi de lui.

La liaison de l'économie à l'atmosphère s'exprime par l'accroissement des quantités de gaz à effet de serre liées aux émissions des activités humaines. En retour cet accroissement provoque des modifications du climat (chroniques de températures, de pluies du climat, d'événements extrêmes). Ce sont ces modifications qui vont à leur tour déterminer des changements dans l'activité économique, lesquelles peuvent prendre la forme de « dommages » (sécheresses, canicules,...) se traduisant par des pertes de production ou des coûts supplémentaires (par exemple climatisation, irrigation...ou destructions liées aux événements extrêmes). Mais ces changements peuvent, en d'autres lieux, se traduire par des modifications positives (allongement de la durée de végétation, augmentation des récoltes) et donc des bénéfices.

Les couplages au sein du modèle intégré peuvent être plus ou moins forts, selon que les modules sont résolus simultanément ou successivement. En effet, il n'est pas

toujours nécessaire de fermer la boucle des interdépendances pour examiner les effets environnementaux des technologies énergétiques, agricoles, de transport, d'habitat, et les arbitrages possibles entre elles.

Les différents modules peuvent être représentés à des niveaux de finesse différents. Mais plus que la résolution spatiale, c'est la question du niveau de complexité des modules en tant que systèmes non linéaires qui importe. En particulier, la plupart des modèles économiques de long terme s'intéressent au problème de la croissance en supposant les marchés proches de l'équilibre. Ils ne sont pas configurés pour rendre compte de changements structurels profonds qui touchent à la fois aux évolutions des structures physiques de la production et aux changements importants des comportements ou des régulations économiques.

En raison de cette difficulté, beaucoup de modèles intégrés sont fondés sur une description explicite des technologies, une représentation du système énergétique dite de type « bottom up » (c'est-à-dire où les technologies sont représentées explicitement). Il était en effet impossible de ne pas rendre compte, par exemple, du passage de sources d'énergies primaires comme la « filière gaz » pour la production d'électricité à une « filière charbon avec séquestration géologique du CO₂ » ou encore le passage d'habitats actuels mal conçus sur le plan énergétique à des habitats rénovés bien conçus sur le plan énergétique. Par ailleurs avec l'extension de la liste des gaz à effet de serre et l'influence des pratiques agricoles sur les émissions ou captation de ces gaz, les activités humaines qu'il importe de représenter en détail s'étend aussi aux usages des sols.

Dans un premier temps, pour éviter d'avoir à décrire physiquement toute l'économie (les services, l'état...) on s'est orienté vers des modèles mixtes qui couplent une représentation agrégée de la macro-économie à une représentation détaillée du système énergétique. Mais la conception de modèles mixtes se heurte à son tour à des difficultés. L'évolution du secteur de l'énergie lié à la réduction des émissions induit par exemple par des changements

structurels dans le reste de l'économie dont les modèles mixtes ne peuvent pas toujours rendre compte en raison du manque de détail de la description macro-économique. Ainsi, dans les nations industrielles, le secteur du bâtiment devra faire face à chantier considérable, celui de la rénovation énergétique des bâtiments existants, qui implique une hausse du niveau de la production de matériaux de construction et une augmentation importante de l'emploi du secteur. Si le nombre de bâtiments à réhabiliter se compte en centaines de milliers par an (ce qui sera le cas dans les pays d'Europe) c'est aussi en centaines de milliers que se comptera l'emploi induit. Par ailleurs la nature même de ces emplois (qui devraient permettre de passer à des consommations énergétiques dans les habitats de 300kwh par m2 à 50kwh par m2) seront des emplois hautement qualifiés, différents des professions actuelles du bâtiment.

Le couplage exige aussi de traiter la question de l'adaptation des échelles de temps, et de la discrétisation des modèles continus. Un pas de temps de l'ordre d'une année est souvent retenu, car cela correspond à une période fondamentale commune à la macroéconomie et à la climatologie. L'année est le cycle complet de consommation qui contient une saison agricole pour les productions de l'agriculture et une saison de consommation d'énergie avec l'été et l'hiver. Par ailleurs, le système global évolue d'une année sur l'autre, cette évolution concerne à la fois les variations de composition de l'atmosphère et donc les déterminants du climat pour la partie géophysique du modèle, mais également les variations de tout ce qui concerne les grandeurs économiques, à savoir les niveaux d'équipements relatifs aux technologies de production (par exemple le nombre de centrales électriques à charbon dans chaque pays...) et enfin les niveaux des ressources en combustibles fossiles par exemple.

Les équations dynamiques

Au coeur de tout modèle, un système d'équations dynamiques relie les variables exogènes, c'est à dire données hors du modèle, et les variables endogènes, c'est à dire calculées par le modèle. Parmi les

variables, on distingue les variables d'état (déterminées par la force de l'évolution naturelle) et les variables de contrôle (soumises au choix du décideur). Les variables qui représentent des quantités sont soit des flux, comme les productions de charbon, d'électricité ou les émissions de gaz à effet de serre, soit des stocks comme le nombre de centrales électriques, les superficies de rizières, ou la quantité de CO2 dans l'atmosphère. D'autres variables ne représentent pas des quantités ; elles expriment des « équilibres » entre les processus géophysiques (température) ou économiques (prix).

Les valeurs possibles des variables sont liées par des équations et des contraintes que l'on peut grouper en plusieurs classes: équations d'équilibre intra-périodiques, lois d'évolution inter périodiques, conditions initiales et finales. Ces dernières fixent les variables à la première ou à la dernière période du calcul.

Les équations intra périodiques représentent par exemple l'équilibre des bilans physiques des biens et services. Ainsi, dans un modèle détaillé, on exprime que le charbon consommé pour les usages électriques et thermiques est (aux variations de stocks près) celui qui a été extrait des mines de charbon. Dans un modèle détaillé il existe autant d'équations de ce type que de biens, matériaux ou service pris en compte. Dans un modèle « réduit » on exprime que la production est égale à l'investissement additionné à la consommation. Dans ce même groupe d'équations on totalise les émissions de toutes les activités énergétiques qui sont liées à l'activité des centrales électriques, l'énergie pour le chauffage, l'industrie, etc..

Dans les équations inter périodiques on exprime les évolutions de toutes les catégories d'objets ou de matériaux qui sont sujets à accumulation (évolution de stocks et des équipements installés). Par exemple, on exprime que la quantité de carbone dans l'atmosphère à la période $t+1$ est égale à la quantité à la période t à laquelle sont venues s'ajouter les quantités de carbones émises par les activités humaines (ou se retrancher les quantités qui seraient captées par des activités de séquestration comme la pousse de forêt). Dans ce même groupe d'équations on exprime que le

nombre de centrales nucléaires à l'année $t+1$ est égale à celles de l'année t plus celles qui ont été construites moins celles qui sont détruites, etc. L'évolution démographique des populations est également représentée par de telles équations inter-périodiques liant une période à la suivante et que l'on qualifie d'équations d'évolution.

Les méthodes de résolution

L'emploi des modèles intégrés économie/énergie/climat est notablement plus délicat de celui des modèles des sciences naturelles dont le but est de simuler pour prévoir. En effet les trajectoires dépendent d'un ensemble de décisions, représenté par les variables de contrôle, qui ne sont pas déterminées par avance mais dépendent des choix. Comment rendre compte de ces comportements décisionnels dans la résolution des équations du modèle ? Plusieurs stratégies de modélisation sont couramment utilisées (voir la Table 1 à la fin de ce document), qu'on peut diviser en deux familles: causales et téléonomiques.

La première stratégie consiste à poser les variables de contrôle comme exogènes. Le modèle est utilisé pour tester des scénarios imposés de l'extérieur. Typiquement, il permet de calculer quels changements climatiques se produiraient si on ne fait rien.

Une seconde option est de doter les décideurs (du modèle) d'une rationalité limitée. On peut supposer par exemple qu'ils prennent leurs décisions sur la base des prix et des habitudes. On peut alors écrire des lois du comportement phénoménologiques déterminant les variables de contrôle en fonction l'état actuel ou des trajectoires passées. On se donne un algorithme de décision causal, c'est à dire qui dépend du passé.

Dans ces deux premiers cas, étant donné les conditions initiales, on peut résoudre les équations de la seconde période à partir de la première période, puis de la troisième à partir de la seconde. Ainsi le modèle peut être résolu de façon séquentielle ou récursive, jusqu'à la dernière période. Le modélisateur n'est pas maître de l'état final.



Illustration 2: Les modèles intégrés reposent sur des scénarios d'évolution de la planète, comme autant de planètes fictives, à l'image de cet étal sur un marché brésilien.

Toutefois le comportement réel du système économie/énergie/climat n'est pas causal mais bien téléonomique, c'est à dire que les décisions sont prises en fonction des buts à atteindre: limiter les risques liés au changement climatique, utilisation intertemporellement efficace des ressources naturelles et financières... Cela amène à considérer les équations pour toutes les périodes comme un « système d'équations simultanées » que l'on résout globalement. Au contraire de l'approche récursive précédente, il est possible dans ce cas d'imposer un état final comme contrainte, cette contrainte agit comme par rétro-inférence et en fonction de toutes les autres contraintes on trouve alors un ou des cheminement compatible avec cet état final ou bien au contraire on se trouve face à des impossibilités.

Là encore, plusieurs approches sont utilisées. Une approche en satisfaction des contraintes pure consiste à s'intéresser à l'ensemble des contrôles compatibles avec un objectif donné. On peut ainsi, par exemple, affirmer que la stabilisation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre à l'horizon 2100 exige dans tous les cas une nette diminution des émissions anthropiques des le milieu du siècle.

Mais il est plus courant en économie de représenter les anticipations des décideurs en supposant donc qu'ils agissent au mieux en fonction de leurs intérêts, connaissant la

dynamique future décrite par le modèle. On peut alors distinguer la résolution en coût-efficacité et la résolution coût-avantages. Dans la première, les agents calculent comment obtenir au moindre coût un but donné par avance, par exemple un niveau donné de réduction. Dans la seconde, le modèle calcule lui-même l'arbitrage entre les coûts de réduction, d'adaptation et de dommages pour déterminer l'objectif environnemental. Les incertitudes sur le « coût-efficacité » sont pour une large part des incertitudes sur l'innovation technologique, elles sont moins sérieuses que les incertitudes sur l'évolution du climat, ce qui explique que les exercices coût-efficacité soient plus développés.

Notons que la discussion précédente omet un aspect important de la dynamique du changement climatique, où il importe de distinguer deux niveaux de prise de décision: la politique publique et le comportement des agents micro-économiques. Si le premier niveau peut être éventuellement globalement coordonné dans le cadre d'une Convention-Climat et dirigé par un but à long terme, le second est plutôt décentralisé, par l'intermédiaire des prix pour les biens de marchés. Les deux types de décideurs n'ont donc pas en général le même horizon temporel ni le même système de valeurs.

On comprend donc que dans les deux cas, incorporer la décision dans le modèle suppose de préciser une certaine « phénoménologie de l'action » qui implique de définir quel est l'horizon temporel que les acteurs appréhendent et selon quel système de valeur ils décident les investissements (et donc la transformation du système). Ces paramètres introduisent un second niveau d'incertitude dans les résultats du modèle.

Dans la simulation séquentielle les acteurs de l'économie sont myopes et ne voient que la période courante (ses prix, etc). Dans la résolution inter-périodique les acteurs voient leurs actions jusqu'à la fin des temps. Certes, aucun de ces partis ne correspond vraiment à la réalité où, de fait, des multiples acteurs prennent des décisions à partir du passé, de ce qu'ils imaginent du futur, ou de leurs pulsions à partir du présent. Mais il faut observer que d'une part il existe, dans la réalité, de multiples

organismes réalisant des prévisions et des projections pour les acteurs économiques réel ce qui implique qu'il existe bien une certaine connaissance des configurations du futur ; l'idée d'anticipation n'est donc pas absurde (le débat actuel sur l'horizon du « peak oil », la « fin du pétrole bon marché » en témoigne). De la même manière, les résolutions qui mettent en avant « l'équilibre général » traduisent l'existence d'un certain nombre de coordinations entre les agents économiques (négociations internationales sur le commerce, nationale sur les salaires, coordination entre producteurs et distributeurs et bien sûr coordination par les prix...).

Une rencontre des cultures

La légitimité scientifique de la modélisation intégrée est difficile à définir. Ce n'est pas celle des sciences expérimentales car les « simulations » numériques sur plusieurs siècles ne peuvent être vérifiées (d'autant plus que l'on explore de nombreuses configurations d'événements potentiels qui n'accéderont jamais à l'existence). Ce n'est pas non plus celle des mathématiques puisque le modèle se réfère explicitement au réel (les variables et les paramètres sont mesurables). Enfin, les modèles intégrés sont aussi en décalage par rapport aux pratiques courantes dans la plupart des sciences sociales, puisqu'il s'agit de modèles quantitatifs plutôt que qualitatifs.

Ce problème de légitimité scientifique est amplifié par le fait que les modèles sont souvent l'objet de commandes publiques ou privées. Ils encourent alors le risque d'apparaître comme des boîtes noires au service d'intérêts particuliers, d'autant plus qu'ils sont appliqués à des problèmes controversés dans lesquels l'incertitude scientifique n'est pas encore résolue. Par exemple, pour des sujets comme l'ozone ou l'effet de serre, la compréhension scientifique de base n'est pas encore stabilisée. Les coûts techniques des mesures de prévention sont mal connus par les industries concernées. Les effets macroéconomiques des politiques restent incertains.

On améliore alors la légitimité de ces modèles en assurant une base technique méticuleuse garantissant l'objectivité, la neutralité et la reproductibilité des

résultats. C'est la qualité des modèles en tant que produits logiciels. Mais plus important encore, il faut assumer et tenir compte de la différence de fond concernant la représentation de l'incertitude entre les sciences positives et les sciences morales.

En effet, la nature de l'information et de l'ignorance représentée dans les modèles diffère profondément selon les disciplines. Les sciences positives, la physique par exemple, sont caractérisées par l'ambition de la rationalité la plus complète. Les théories physiques sont fondées sur des variables précisément définies et mesurées numériquement, et surtout le paradigme de l'expérience contrôlée répétable fonde une vision du monde dans laquelle on peut accéder à une prédiction précise du futur, fut-elle probabiliste. Ce n'est pas le cas dans les sciences de l'homme et de la société. Même en économie, discipline relativement plus formalisée et quantitative, on admet l'importance du libre-arbitre individuel, du jeu des acteurs et de la psychologie. Les sciences morales, la philosophie par exemple, envisagent un univers imprécis et controversé. Dans ces disciplines, l'imprécision des connaissances autant que le fait que l'on cherche à imaginer le futur pour en détourner le cours ne permet pas de viser la prévision. C'est pourquoi les modèles intégrés ne cherchent pas à prévoir, mais seulement aider à comprendre pour décider. Ce sont des modèles possibilistes plus que probabilistes.

Cependant, rapprocher autour d'un objet de recherche commun qu'est le changement climatique, des scientifiques d'horizon divers permet à chacun de revenir vers sa disciplines avec des idées nouvelles.

C'est ainsi qu'une culture propre à la physique est transférée vers l'économie. La pensée économique contemporaine est accoutumée à représenter les processus de production essentiellement en unités monétaire et financières, car elle s'appuie sur des sources statistiques telles que les comptabilités nationales qui sont exprimées en valeur. Mais quand on cherche à maîtriser la question des émissions notamment sur plusieurs gaz, on doit prendre en compte la réalité physique des processus et des équipements liés aux activités humaines. Ce retour vers une certaine tradition de représentation des

phénomènes à la fois sur le plan physique et par leur projection sur un monde de valeur apparaît notamment dans la théorie de l'équilibre général (analyse input-output, taux de change réels) et dans les sciences économiques sectorielles (économie de l'énergie, économie rurale, économie industrielle...).

Le transfert inverse se fait aussi. Les modèles du Changement Climatique sont destinés à étudier les « contrôles » que représentent les mesures politiques. Les actions humaines sont à l'origine des phénomènes: on tente d'infléchir les actions « naturelles » des agents économiques vers moins d'émissions. Ainsi, les modèles intégrés s'écartent des modèles de la physique macroscopique qui dans de nombreuses situations sont des modèles de simulation déterministe (dans un sens de « prévision ») pour se placer sur le terrain de la théorie du contrôle (méthodes inverses, méthodes probabilistes...).

L'avenir de la modélisation intégrée

La diffusion des modèles intégrés, tout comme celle des théories scientifiques, est marquée par des rendements d'adoption croissants. Cela signifie que plus un modèle est répandu, plus il est facile de l'adopter pour ses propres recherches. Ce qui conduit à la sélection d'un petit nombre de modèles classiques et largement documentés, dont le code source est libre et largement disponible et qui, de ce fait, sont reproduits dans différents pays et font l'objet d'un développement coopératif. La coopération permet le partage des données, des innovations méthodologiques, de l'expérience, ainsi que la comparabilité des modélisations nationales.

On peut donc penser que l'avenir des modèles continuera à être marqué par un processus de consolidation de communautés autour de modèles paradigmatiques et coopératifs, comme MARKAL ou DICE (voir Encadré 1). Toutefois il continuera à exister des modèles idiosyncrasiques, propres à une équipe, mais dont les données et le calibrage ne sont pas publiés et dont le contrôle par les pairs ne peut-être que partiel. Une frange de modèles scientifiques innovants se positionnant sur des niches intellectuelles à la limite du champ sera

Encadré 1: Une brève histoire de la modélisation intégrée

La modélisation actuelle doit beaucoup à John von Neumann, qui fut un pionnier des formes modernes de la théorie économique, l'inventeur de l'ordinateur, le premier également à développer des programmes informatiques consacrés à la prévision météorologique. Les modèles économiques de long terme et la représentation de la base physique de l'économie résultent aussi du travail de Frank Ramsey et Piero Sraffa, à Cambridge. Tous deux furent les interlocuteurs privilégiés du logicien Ludwig Wittgenstein. La réflexion de ce dernier et celle du Cercle de Vienne sur la formalisation du réel dans les années 1930 a sûrement inspiré les démarches de modélisation.

Au début des années 1970, la modélisation intégrée émerge de l'analyse des systèmes et de la recherche opérationnelle, avec les travaux de Jay W. Forrester pour le *Club de Rome*. Son modèle *WORLD3* est un des premiers à représenter les interactions entre l'environnement et une économie à l'échelle du monde. Il a servi à lancer le débat sur les ressources épuisables en montrant l'importance du risque de trajectoire « overshoot and collapse », ce qu'on appellerait aujourd'hui un développement non durable.

Mais il fut critiqué par des économistes parce qu'il ne représentait pas les processus d'innovation inévitables que provoqueraient

l'épuisement des ressources minières et les hausses des prix correspondantes des matières premières. A la suite des premières alertes à propos de l'effet de serre et de l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère, William D. Nordhaus de la *Cowles Foundation for Research in Economics*, à l'université de Yale aux États Unis, a l'idée de coupler une représentation agrégée de l'économie avec une représentation agrégée du cycle du carbone et des impacts du réchauffement global: c'est le modèle DICE.

La crise de l'énergie débute à la même époque, en 1971-1973, et motive la création d'une série de modèles de planification des systèmes énergétiques nationaux, élaborés dans une perspective d'ingénieur. Le plus élaboré de ceux-ci, conçu par des chercheurs américains au *Brookhaven National Lab* et allemand à *Jülich* aboutit assez rapidement à un modèle encore en usage de nos jours, le modèle MARKAL.

Cette première étape (1970-1980) de capitalisation de connaissances sur la modélisation économique, environnementale et énergétique devait durablement marquer les efforts de la période suivante (1980-2000). Parmi les nombreux modèles de dynamique des systèmes (de type *WORLD3*), et le modèle *IMAGE* qui dans ses versions les plus récentes offre une visualisation fine des impacts possibles du changement climatique en Europe. Quand aux modèles DICE et MARKAL, ils ont fait école et on ne compte plus les variantes encore utilisées aujourd'hui.

toujours nécessaire pour renouveler les pratiques et une diversité des sources d'informations est importante pour confirmer ou critiquer les résultats des modèles paradigmatiques.

Un courant important en modélisation intégrée met l'accent sur la participation des décideurs à la construction du modèle. En effet, le but ultime de ces modèles étant de favoriser la prise de décision informée objectivement, l'implication des communautés concernées ne peut être que bénéfique.

Le principal défi actuel se situe dans la constitution des bases de données. Comparativement aux systèmes d'observation de la physique et de la chimie du globe, les systèmes d'observation des paramètres économiques sont bien moins

maîtrisés. En effet, pour l'essentiel ce type de données est collecté par les États pour les perceptions fiscales, on en imagine donc bien les limites. La corruption, l'économie informelle ou la guerre civile qui touchent des nations entières et très peuplée reste un obstacle important à la connaissance objective de l'économie mondiale.

L'avenir des modèles intégrés repose sur une accumulation de connaissances, de données, d'informations, de procédures informatiques qui puissent être largement partagées entre toutes les équipes. D'autre part, la compréhension de ce qui s'exprime dans un modèle par les équations d'une part, les procédures de résolution d'autre part devra de plus en plus appartenir à une culture commune de la décision.

Références

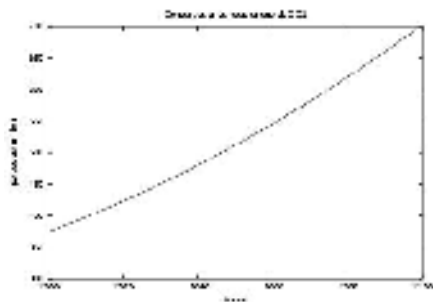
Ha-Duong (M). Transparency and control in engineering integrated assessment models. *Integrated Assessment*, 2 (4):209-218, 2001.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate change 2001, Chap 7, §7.6-"Modelling and cost assessment"*

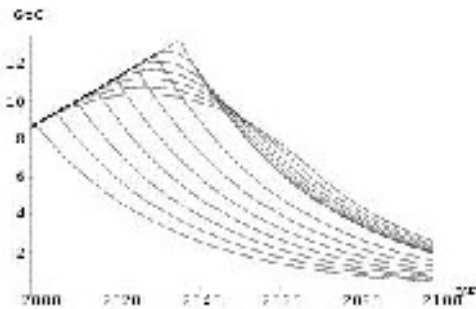
http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/266.htm

Matarasso (P) (2003) « Évaluation intégrée et modélisation » : Comment le changement climatique a transformé la conception que nous nous faisons des problèmes de décision » *Annales des Ponts et Chaussées* n° 107-108, 2003 p 71-79. Editions Elsevier

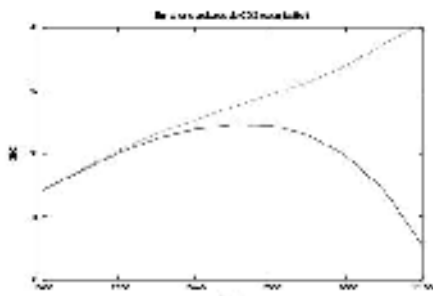
William D. Nordhaus and Joseph Boyer *Warming the World: Economic Models of Global Warming*, The MIT Press, 2000



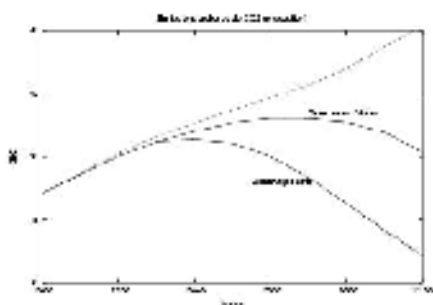
La simulation répond à la question « Que se passerait-il si ... ? » Si on ne fait rien et que les émissions de CO2 suivent la croissance tendancielle représentée ci contre, alors on estime que la concentration de ce gaz à effet de serre à la fin du siècle elle dépassera 650 parties par millions.



La satisfaction des contraintes répond à la question « Comment peut-on arriver à... ? » Si l'on fixe un plafond de concentration à ne pas dépasser (ici 550 parties par million), on obtient une famille de trajectoires d'émission de CO2 à respecter. En effet, la satisfaction des contraintes ne détermine pas une trajectoire unique, mais une gamme de possibilités. Dans tous les cas, les émissions devront diminuer.



L'optimisation répond à la question « Comment agir au mieux pour ... ? » Si l'on souhaite minimiser le coût total du changement climatique, un modèle tel que DIAM calcule une courbe d'émissions de CO2 qui équilibre les intérêts des générations présentes et à venir.



La programmation dynamique stochastique répond à « Comment agir prudemment pour ... ? » Si on suppose que le plafond de concentration ne sera fixé qu'en 2020 en fonction des dommages causés par le changement climatique, on calcule une stratégie d'émission optimale à deux branches. La branche haute correspond à des dommages faibles, la basse à des dommages forts. Autrement dit, la stratégie consiste non pas à calculer une commande optimale pour le siècle à venir, mais à définir une politique de précaution qui sera adaptée avec le temps.

Table 1.: La modélisation intégrée offre diverses manières de résoudre un même programme en fonction du type de réponse attendue. Quatre types de résolutions sont illustrées ici par les courbes d'émissions de CO2 prévues ou escomptées: la simulation, la satisfaction des contraintes, l'optimisation et la programmation dynamique stochastique. Source: DIAM 2.7.