



HAL
open science

La modélisation intégrée économie – énergie – climat

Minh Ha-Duong, Pierre Matarasso

► **To cite this version:**

Minh Ha-Duong, Pierre Matarasso. La modélisation intégrée économie – énergie – climat. 2006.
halshs-00078623v1

HAL Id: halshs-00078623

<https://shs.hal.science/halshs-00078623v1>

Preprint submitted on 6 Jun 2006 (v1), last revised 3 Jul 2006 (v2)

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.

La modélisation intégrée économie – énergie – climat

Minh Ha-Duong, Pierre Matarasso

haduong@centre-cired.fr, matarasso@centre-cired.fr

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
CIRED-CNRS-EHESS

02/05/06

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 CO_2 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 CO_2)? Combien de temps pouvons-nous laisser aller les choses sans rien modifier de nos pratiques ?

Pour certains, le climat pourrait devenir plus favorable. Il n'y aurait pas urgence à modifier profondément nos styles de vie, surtout si on tient compte de l'ingéniosité humaine qui saura exploiter les opportunités pour s'adapter aux changements quels qu'ils soient. D'autres soulignent qu'il est déjà grand temps d'agir face au risque. Les dynamiques de développement économique actuelles et attendues sur les trente prochaines années rendent difficile toute inflexion rapide des émissions à la baisse. 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 discursifs sur la précaution en faisceaux d'arguments logiquement organisés, basés sur des connaissances scientifiques mesurables. Ils sont construits dans l'espoir de permettre aux citoyens, aux instances de décision nationales et internationales de prendre des décisions mieux informées. Les modèles intégrés 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.

Des recherches tirées par un problème global

En effet, si chaque discipline peut apporter des connaissances sur une part des processus qui vont déterminer l'évolution du système Terre - Société, leur mise en interaction est inévitable pour chercher à comprendre les implications des différentes politiques possibles « à priori »

Par exemple, si les Modèles de Circulation Générale (GCM) des climatologues ont suffi pour confirmer l'alerte à propos du changement climatique, étudier les stratégies de réduction d'émissions demande de se pencher sur les déterminants de l'utilisation des énergies fossiles. Au-delà des technologies de production et de transformation de l'énergie même, cela suppose de modéliser les technologies physiques de production de biens et services. De plus, la représentation physique doit être insérée dans les grands équilibres monétaires et financiers qui constituent l'environnement de régulation de l'économie. En effet, les futurs possibles sont aussi contraints par les possibilités d'investissement, les budgets des ménages, les prix et échanges internationaux et les mouvements de capitaux.

Un modèle intégrant l'évolution de l'économie mondiale et en particulier de sa base physique (énergie, usage des sols, activités économiques...) avec les évolutions climatiques et écologiques correspondantes, peut être utilisé pour étudier les questions suivantes, déterminantes pour les décisions à prendre face au Changement Climatique:

- **Quand agir**, c'est à dire comment répartir l'effort dans le temps: aujourd'hui, dans vingt ans voir dans cinquante ans en espérant du progrès technique ?
- **Où agir**, c'est à dire comment répartir l'effort dans l'espace: dans les pays où le capital est stable ou dans ceux où il se construit ?
-
- **Comment agir** : Quelles mesures réglementaires ou économiques mettre en œuvre pour inciter les agents économiques à converger vers les actions favorables ?
-
- **Quelles technologies préférer** (du côté de l'offre : techniques de production d'énergie sans émissions ou du côté de la demande : améliorations des rendements de la production de services énergétiques...)?

Les modèles ne possèdent pas pour seule vertu celle de déterminer les conséquences d'un portefeuille d'actions (réparties en mesures économiques et réglementaires, choix de technologies dans le temps et l'espace), ils possèdent un but plus audacieux, celui de suggérer des gammes d'actions dans l'immense combinatoire des actions à envisager.

Éviter la tentation démiurgique

Lorsque l'on parle du changement climatique, c'est toute la Planète Terre qui est concernée. Ce qu'il s'agit de comprendre, ce sont 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.

Légitimité scientifique et nature du savoir

Si intégrer des modèles de disciplines différentes permet de mieux analyser le problème de la précaution dans le domaine des risques d'environnement globaux, cette pratique pose un problème de légitimité scientifique. Chaque discipline a ses propres traditions sur ce qui fait la qualité d'un modèle et sur les limites du modélisable. La légitimité de la modélisation intégrée 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'évènements potentiels qui n'accéderont jamais à l'existence). La légitimité de la modélisation intégrée 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 et non narratifs.

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.

Deux niveaux de réponse sont nécessaires pour éclairer la question de la légitimité. En premier lieu, il faut bien sûr assurer une base technique méticuleuse garantissant l'objectivité, la neutralité et la qualité des modèles en tant que produits logiciels. De telles conditions sont indispensables à la reproductibilité des résultats. 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, même si elle est probabiliste, du futur.

Ce n'est pas du tout 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, de la psychologie et des valeurs. Les sciences morales, la philosophie par exemple, reconnaissent la réalité d'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 par nature, les modèles intégrés ne cherchent pas à prévoir, mais seulement aider à comprendre pour décider. Ce sont des modèles possibilistes plus que probabilistes.

Structure générale

*** LA FIGURE 1 ILLUSTRE CE PASSAGE***

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:

- 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.

Modèle = système d'équations dynamiques

Au coeur de tout modèle, on trouve un système d'équations dynamiques entre diverses variables. Il existe plusieurs façons de classer les variables et les équations, en fonction de l'objet représenté et des statuts décisionnels des variables.

On distingue les paramètres dits exogènes, c'est à dire donnés hors du modèle, des variables endogènes, c'est à dire calculées à l'intérieur du modèle. Parmi ces dernières, on distingue les variables d'état (déterminées par la force de l'évolution naturelle) et les variables de commande (soumises au choix du décideur). Parmi les variables qui représentent des quantités, on peut distinguer les variables de flux, comme les productions de charbon, d'électricité ou les émissions de gaz à effet de serre, des variables de stock comme le nombre de centrales électriques, les superficies de rizières, ou la quantité de CO₂ dans l'atmosphère. Certaines variables, comme la température ou les prix, ne sont ni de stock ni de flux car elles ne représentent pas des quantités.

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.

Les équations « **intra périodiques** » expriment que ce qui a été consommé durant une période doit avoir été produit auparavant. Ainsi, dans un modèle détaillé, on exprime que le charbon consommé pour les usages électriques et thermiques est (aux stocks constitués 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.

Le nombre d'équations « intra périodiques » est proportionnel au nombre de périodes, le nombre d'équations « inter-périodiques » au nombre de périodes moins une unité. A ces équations on doit ajouter des équations qui définissent les condition initiales, c'est à dire celles qui fixent les variables à la première période.

Il faut ajouter et ceci pour faire une liaison avec le paragraphe qui suit, que la résolution du système d'équations va contribuer à déterminer des variables qui ne sont ni de stock, ni de flux mais qui expriment des « équilibres » qui s'établissent entre les différents processus que ceux ci soient géophysiques (température) ou économiques (prix).

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, 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.

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 inter-temporellement 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 sérieuse que les incertitudes sur l'évolution du climat, ce qui explique que les exercices coût-efficacité soient plus développés.

Limites des modèles

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 microéconomiques. 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.

•

Il est aussi nécessaire d'introduire l'incertitude dans les résolutions précédentes. On peut sous certaines conditions définir les trajectoires qui introduisent le moins de risques, les moments où il conviendrait d'agir en fonction de l'arrivée d'informations levant le voile sur certaines incertitudes, etc

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 intertemporelle 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 impulsions 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 réels 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...).

Apports de l'intégration

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.

Transférer une culture de la physique vers l'économie : La pensée économique contemporaine est accoutumée à représenter les processus de production essentiellement en unités monétaire et financières, que ce soit à des fins de prévision ou de planification. Cette posture est légitimée par la nécessité de s'appuyer sur des sources statistiques fiables comme les comptabilités nationales lesquelles sont exprimées principalement en valeur. Mais dès lors que l'on cherche à maîtriser la question des émissions notamment sur plusieurs gaz, la réalité physique des processus et des équipements liés aux activités humaines doit être prise en compte. Au-delà des aspects énergétiques, la question de l'usage des sols et des couverts végétaux qui jouent un rôle central dans le cycle du carbone doit également être pris en compte. Pour cela, les modèles purement en valeur des processus de l'économie sont insuffisants.

Ainsi, les modèles intégrés suggèrent un retour vers une certaine tradition dans la théorie économique de représentation des phénomènes à la fois sur le plan physique et par leur projection sur un monde de valeur. Cette tradition est notamment utilisée dans la théorie de l'équilibre général (analyse input-output, taux de change réels) de même que dans les sciences économiques sectorielles (économie de l'énergie, économie rurale, économie industrielle...).

Mais les modèles intégrés suggèrent aussi de « *transférer une culture de l'économie vers la physique* ». Les modèles du Changement Climatique sont destinés à étudier des « commandes » ou des « contrôles », que l'on traduira en termes de politiques permettant d'éviter des catastrophes . Ce sont les actions humaines qui sont à l'origine des phénomènes il faut donc construire des modèles pour définir des politiques publiques supposées infléchir les actions « naturelles » des agents économiques vers moins d'émissions. Ainsi, les modèles intégrés suggèrent de s'écarter 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, peuvent être reproduits dans différents pays et faire l'objet d'un développement coopératif. Le développement coopératif permet le partage des données, des innovations méthodologiques, de l'expérience ; il permet encore comparabilité des modélisations nationales et l'échange d'information sur les manières de réduire les émissions ce qui pour un phénomène global est une nécessité.

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 (un encart pourra être consacré à ces deux modèles...). 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 toujours nécessaire pour renouveler les pratiques et une diversité des sources d'informations est importante pour confirmer ou critiquer les résultats des modèles paradigmatiques.

Les modèles intégrés idiosyncrasiques n'ont donc pas seulement une valeur pour l'expertise et la vente d'études appliquées aux décideurs nationaux, mais contribuent bien à la vitalité scientifique du champ. In fine, un courant important en modélisation intégrée met l'accent sur la participation des décideurs à la co-construction du modèle. En effet, si on revient sur le but ultime de ces modèles qui est de favoriser la prise de décision informée objectivement, l'implication des communautés concernées dans et par l'analyse est un facteur-clé de communication des résultats nécessaires pour remplir le rôle social des modèles intégrés.

Finalement, dans ces conditions d'une standardisation autour d'un petit nombre de modèles, nous pensons que 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.

Dans tous les cas 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.



Les figures et encadrés :

Encadré 1 – Brève histoire de la modélisation intégrée et de ses origines

La modélisation intégrée émerge au début des années 1970 de l'analyse des systèmes et de la recherche opérationnelle, avec les travaux de Jay W. Forrester pour le Club de Rome (1972). 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.

Très vite ce modèle fut critiqué par des économistes à cause de l'absence d'une représentation des processus d'innovation que provoqueraient inévitablement l'épuisement des ressources minières et les hausses des prix correspondantes des matières premières. C'est aussi la période des premières alertes à propos de l'effet de serre et de l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère. Dans ce contexte, c'est William D. Nordhaus de la Cowles Commission qui un des premiers couple une représentation agrégée de l'économie avec une représentation agrégée du cycle du carbone et des impacts du réchauffement global, avec le modèle DICE.

La crise de l'énergie qui débute à la même époque en 1971-1973 motive la création d'une série de modèles de planification des systèmes énergétiques nationaux, élaborés dans une perspective d'ingénieur. La plus élaborée de celle-ci, conçue par des chercheurs américains au Brookhaven National Lab et allemand (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 (à la World3s, 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.

Pour ceux que l'histoire de la modélisation intéresse, il est important de rappeler le rôle de quelques scientifiques majeurs dans l'émergence des concepts qui sont à la base des modélisations actuelles. En premier lieu les modèles économiques de long terme et la représentation de la base physique de l'économie doivent beaucoup à deux chercheurs qui, à Cambridge, furent les interlocuteurs privilégiés de Wittgenstein : Frank Ramsey et Piero Sraffa. Plus généralement, la modélisation actuelle doit beaucoup à Von Neumann, qui fut un pionniers 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. On pourrait d'ailleurs s'interroger sur l'influence de Wittgenstein et du Cercle de Vienne, dont Von Neumann fut proche, dans les démarches de formalisation du réel. La réflexion sur la formalisation du réel atteint dans les années 30 une profondeur que les progrès techniques des ordinateurs ont, quelque peu relégués au second plan, au profit de

démarches exclusivement techniques. Le défi de la représentation des évolutions planétaires ne manquera pas de nous contraindre à reprendre les questions d'interprétation des démarches formalisées. Se retourner vers ces questions d'histoire de la modélisation n'est pas du passéisme. C'est sans doute une des conditions pour avancer vers une conceptualisation de la « mise en modèle » qui permette de faire de cet instrument un instrument vraiment démocratique.

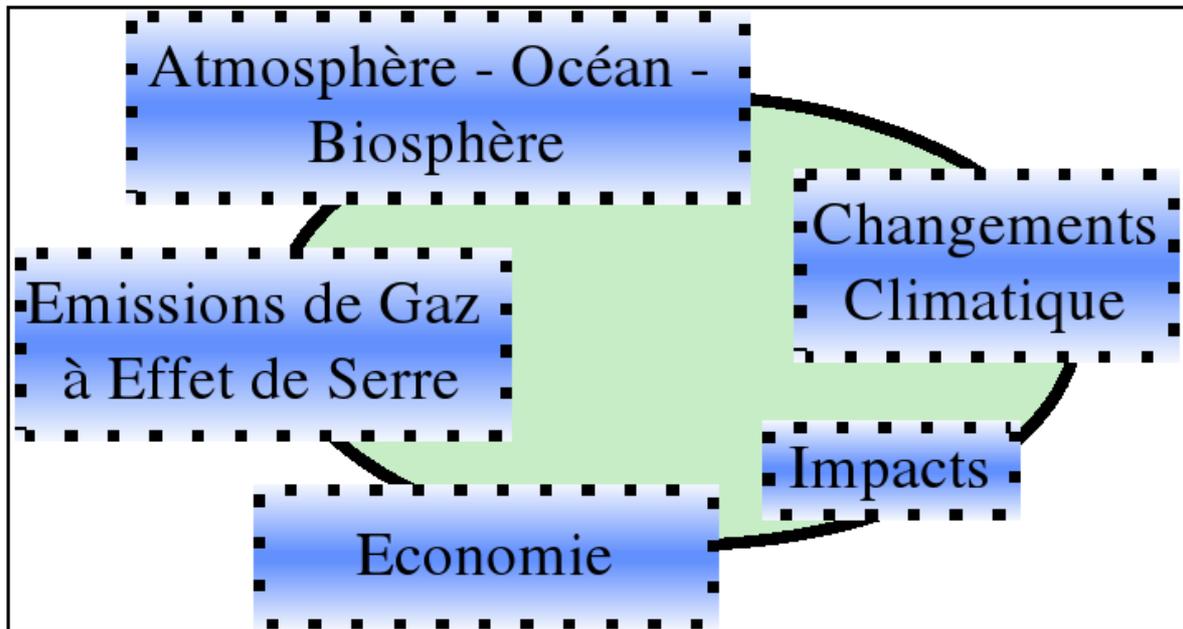


Illustration 1.: La modélisation intégrée du changement climatique (voir IPCC ?)

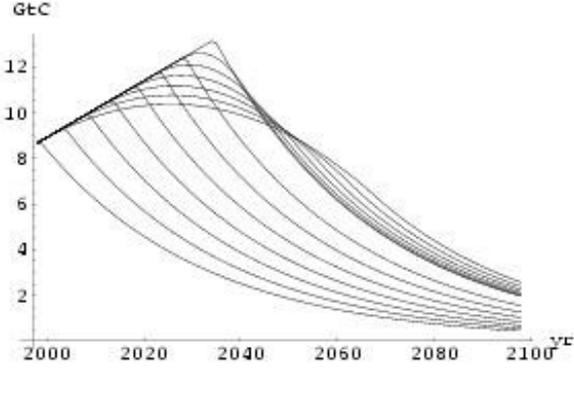
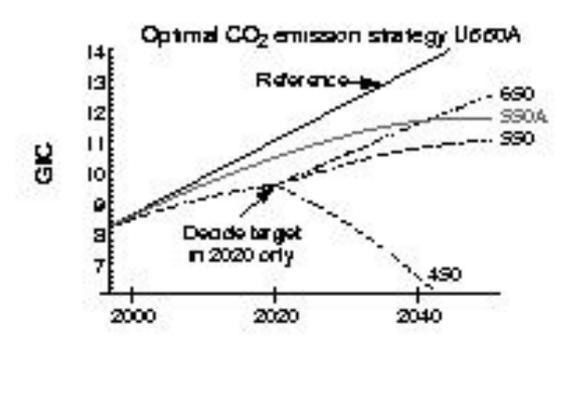
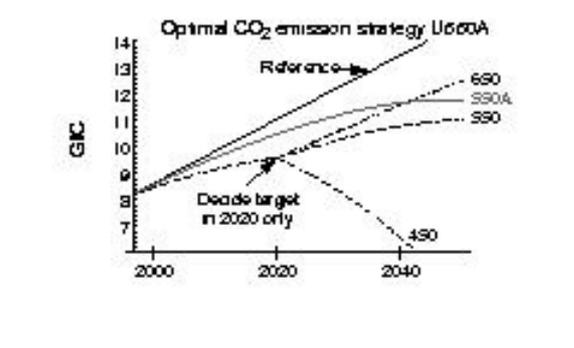
<p>A trouver: famille des scénarios d'émissions de stabilisation IPCC</p>	<p>Simulation séquentielle récursive, modèles déterministes avec représentation des comportements. voir où nous conduisent des comportements préétablis</p>
	<p>Satisfaction des contraintes, viabilité</p>
	<p>Optimisation inter temporelle avec cadre d'optimisation qui représente un « comportement global ». entre rendre compte d'une anticipation des agents et.....recherche d'une politique optimale.</p>
	<p>Résolution sous incertitude, programmation dynamique stochastique</p>

Table 1.: Modes de résolution. des modèles intégrés