

ARP « Changements Environnementaux Planétaires (CEP) »

Atelier 4 : Vulnérabilité et adaptation des sociétés aux CEP

Aperçu sur les modèles : forces et faiblesses

Pierre-Yves Longaretti (OSUG) et Patrick Criqui (LEPII)

On peut distinguer trois grands types de modèles portant directement sur la question des changements globaux : les modèles climatiques, les modèles économiques/énergétiques, et les modèles globaux intégrés environnement/économie/énergie. Seuls les deux premiers sont représentés en France.

1. Modèles climatiques

Les deux derniers rapports du GIEC (2001 et 2007) donnent une vision très détaillée de l'état de l'art sur la construction, l'évaluation, la comparaison, les résultats et les zones d'incertitude des modèles climatiques. Seuls quelques éléments concernant ces modèles sont rappelés ici.

Le climat résulte de l'état moyen de l'atmosphère terrestre, conditionné par sa structure et sa composition et par la façon dont son équilibre énergétique s'établit sous l'effet du flux solaire et des échanges avec les autres composants du système Terre : les océans, les calottes de glace, et la surface terrestre. Les outils et concepts de la climatologie sont pratiquement les mêmes que ceux de la météorologie, mais contrairement à cette dernière, la climatologie ne s'intéresse qu'à un état de l'atmosphère moyenné sur des échelles de temps plus grandes que l'année. En conséquence, elle est beaucoup plus sensible aux conditions aux limites (flux solaires et échanges aux interfaces) qu'aux conditions initiales, et son « horizon de prédictabilité » temporelle est considérablement plus grand.

Les modèles climatiques se sont progressivement complexifiés entre les années 70 et les années 90, en couplant un modèle de dynamique et de transfert radiatif de l'atmosphère à des modèles de la surface terrestre et de circulation océanique. Les océans en particulier sont des réservoirs de chaleur et de gaz (notamment les gaz à effet de serre) beaucoup plus importants que l'atmosphère et de beaucoup plus grande inertie. De ce fait ils jouent un rôle important sur le climat et son évolution.

La composition de l'atmosphère, notamment sa teneur en vapeur d'eau, en aérosols et en gaz à effet de serre contrôle son bilan radiatif global et donc le climat. En conséquence, les cycles naturels et artificiels de ses composés ont progressivement été incorporés dans les modèles depuis les années 90. Cette tendance s'est poursuivie avec la prise en compte croissante des mécanismes de chimie atmosphérique et de dynamique de la couverture végétale terrestre depuis le tournant des années 2000.

Cette complexification continue a été rendue possible par les gains exponentiels en puissance des centres de calcul. Ces gains ont permis dans le même temps un accroissement important de la résolution spatiale des modèles. Néanmoins, la dynamique d'échelle à prendre en compte est considérable : plus de 10 ordres de grandeur entre l'échelle globale de la planète et les plus petites échelles pertinentes du problème, et seules les 3 plus grandes au plus peuvent être explicitement calculés. Les phénomènes se produisant aux échelles non calculées sont paramétrisés, tâche rendue difficile par la compréhension encore limitée de certains des processus concernés. Ces deux facteurs constituent la principale source d'incertitude et de différences (en fonction des choix de paramétrisation) des modèles climatiques.

Notamment, les principaux effets physiques contrôlant la dynamique des nuages (en particulier le rôle des aérosols) sont mal connus et se situent à des échelles non résolues; ils constituent la première source d'incertitude dans le calcul du forçage radiatif de l'atmosphère. De même, la topographie aux échelles non résolues (tant terrestre que marine) peut avoir un effet important sur les flots atmosphériques et océaniques. Réciproquement, les échelles non modélisées seraient souvent essentielles pour la prise en compte des impacts économiques et sociétaux du changement climatique, et cette limitation constitue un des points importants d'incertitude à l'interface entre les modèles physiques et les modèles socio-économiques. Finalement, les modèles climatiques ne rendent que peu ou pas compte des possibilités de changements « abrupts » de régime climatique; notamment les conditions de libération massive du méthane piégé dans le pergélisol des zones polaires ou dans les sédiments océaniques sont mal comprises et ses effets potentiels sur le réchauffement climatique peu pris en compte.

D'une façon générale, les informations entre les modèles climatiques et les modèles économiques circulent souvent « à sens unique » : les scénarios d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont une entrée des modèles climatiques, et les impacts du changement climatique associés à ces émissions sont des contraintes des modèles économie/énergie.

Les modèles intégrés globaux environnement/économie/énergie (comme par exemple, en Europe, le modèle IMAGE ou IMAGE-TIMER, même si la dynamique macro-économique est exogène dans ce modèle) visent à prendre en compte une rétroaction entre activités humaines et climat, mais souvent, le module « climat » de ces modèles intégrés est beaucoup plus simple que l'état de l'art en modélisation du climat.

Il existe un peu plus d'une vingtaine de modèles complexes du climat dans le monde, dont deux en

| | Modèles de projection | Modèles d'équilibre par les prix ou d'optimisation |
|---|------------------------------|---|
| Modèles écos. d'ensemble | HERMES NEMESIS ... | IMACLIM GEM-E3 GEMINI |
| Modèles sectoriels (énergie, agric...) | POLES PRIMES ... | MARKAL TIMES EFOM |

France (l'un développé par l'institut Pierre-Simon Laplace, et l'autre par Météo-France). Par ailleurs des modèles simplifiés, calés sur les modèles complets et émulant leur comportement ont été développés (notamment, le modèle MAGICC — *Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change*). Ces modèles sont destinés à explorer plus facilement les impacts du changement climatique (tels que l'augmentation des températures et du niveau des mers) dans les différents scénarios d'émission, et ils sont de ce fait utilisés non seulement par le GIEC, mais aussi dans le cadre de la modélisation économie/énergie.

2. Modèles économie/énergie

Contrairement aux différents modèles climatiques dont les bases physiques et le cadre de modélisation sont communs, il existe divers types de modèles économiques permettant de faire de la prospective énergétique et d'étudier les interactions entre économie et environnement, notamment via le calcul de « trajectoires d'émission » d'un côté, et la prise en compte des impacts du changement climatique de l'autre.

Un premier axe de lecture consiste à séparer les modèles de projection/simulation et les modèles d'optimisation, notamment d'optimisation intertemporelle. Un second axe de lecture distingue les modèles globaux (ou « top-down ») des modèles sectoriels, le secteur considéré étant ici l'énergie (ou « bottom-up »); cette seconde catégorie de modèles est quelquefois qualifiée de modèles « d'ingénieur », mais cette dénomination masque le fait que les prix d'équilibre du marché de l'énergie sont la variable dynamique centrale de ces modèles, et non, par exemple, les flux physiques d'énergie entre les différentes filières énergétiques, même si ces flux sont bien sûr représentés dans tous les modèles. La figure ci-dessous illustre ces deux axes de lecture et mentionne dans chaque catégorie quelques modèles développés ou utilisés en France et en Europe.

A. Modèles d'ensemble :

Les modèles d'ensemble ou top-down partent d'un équilibre macro-économique où les facteurs de production sont progressivement désagrégés en capital, travail, énergie, matériaux; énergie et matériaux sont ensuite progressivement séparés en différentes sources et secteurs, de façon plus ou moins détaillée. Travail, énergie et matériaux sont considérés comme largement substituables. Les demandes intermédiaires (du secteur de production) et finales (des consommateurs) sont elles aussi désagrégés par étape entre les différents types de biens et services.

A l'intérieur de cette catégorie de modèles, on peut distinguer des modèles de prévisions de moyen ou long terme (2030 à 2050, les échelles de temps des modèles climatiques et économiques ne sont généralement pas les mêmes), où les flux ne sont pas issus d'un calcul d'équilibre mais sont fortement calibrés sur des données économétriques passées, et des modèles décrivant les différents marchés de biens ou services de type équilibre général calculable, dont le contenu théorique est plus fort et la calibration économétrique plus faible, et où les échanges intersectoriels sont décrits par des matrices de type entrée-sortie ou matrices de comptabilité sociale. De tous les types de modèles décrits ici, ces derniers sont les plus représentés au niveau international.

La dynamique macro-économique de croissance économique est le plus souvent calculée de façon interne au modèle, mais de manière très simplifiée par prise en compte des flux d'investissement. Cependant des éléments de croissance endogène avec croissance du stock de connaissance ou de prise en compte du progrès technique sont progressivement introduits. Les politiques publiques (fiscalité par exemple) sont par contre prescrites de façon externe, puisque ce sont précisément ces politiques qu'il s'agit d'évaluer.

La dynamique inter-temporelle se développe sous contrainte interne (contrainte budgétaire des ménages, par exemple) et externe (trajectoires économiques répondant à un profil d'émission, par exemple), le choix de ce dernier type de contrainte donnant alors un caractère normatif à cette catégorie de modèles. Ces modèles d'équilibre général donnent à tous les niveaux de désagrégation, la production, les prix, l'emploi, en prenant en compte les équilibres épargne-investissement, et, lorsqu'il s'agit de modèles régionaux (par exemple limités à l'Europe), le commerce extérieur est généralement pris en compte de façon assez agrégée.

B. Modèles sectoriels :

Ces modèles sont considérablement plus détaillés que les précédents en ce qui concerne les secteurs de consommation et les différentes filières et technologies représentées entre les demandes finales d'énergie et les sources primaires telles que combustibles fossiles, nucléaire et sources d'énergie renouvelables. La désagrégation spatiale est en général également plus grande, parce que fondée sur la description de systèmes énergétiques nationaux, de même que par contrecoup la représentation des importations et exportations sur le secteur de l'énergie. En contrepartie, les données macro-économiques globales, notamment les trajectoires de croissance, sont en général définies de façon externe au modèle.

Lorsqu'il s'agit de modèles de simulation ils calculent de façon interne l'équilibre partiel offre-demande sur les différents marchés de l'énergie au cours du temps, la demande étant déterminée par le scénario de croissance choisi, et l'offre étant liée aux capacités de production. Si de plus on se fixe une contrainte de trajectoire d'émission, ces modèles fournissent une évaluation des coûts sectoriels de réduction des émissions de carbone impliquées par une politique donnée de lutte contre le changement climatique.

Les modèles sectoriels d'optimisation tels que MARKAL décrivent l'ensemble des chaînes énergétiques mises en œuvre et recherchent la combinaison de ces chaînes permettant de minimiser – en général aujourd'hui de manière inter-temporelle – le coût global de la satisfaction des besoins en énergie. L'optimisation inter-temporelle se fait de plus sous contrainte, soit de l'utilisation de certaines ressources, soit le plus souvent de la limitation de certains impacts environnementaux, locaux ou globaux. Ces modèles présentent en résultat l'état d'un système idéal, compte-tenu des technologies anticipées, de leurs coûts et de leurs performances.

C. Modèles hybrides :

Parmi les tendances récentes en matière de modélisation économique des changements globaux, on doit noter le développement de modèles hybrides, qui à la suite du modèle MERGE (fusion d'un modèle d'optimisation énergétique et d'un modèle d'équilibre général simplifié) conduisent à introduire plus de détail technologique sur l'énergie, dans une structure de modèle économique d'ensemble. Certaines recherches conduisent aussi à des usages combinés en « soft link » (par opposition au « hard link ») de modèles énergétiques et de modèles économiques. Elles procèdent du même esprit et, si elles sont moins satisfaisantes dans leur principe, elles permettent dans la pratique de conserver la richesse de description des deux familles.

3. Articulation entre modèles économiques et modèles climatiques :

A travers la brève description des modèles climatiques et économiques/énergétiques qui vient d'être faite, on voit que l'on peut concevoir trois grands types d'interactions entre les deux types de modèles :

i. Les modèles économiques (équilibre des marchés et croissance globale) définissent les évolutions de la demande en énergie et en ressources, qui à leur tour impactent sur les grandes variables physiques. Ces données sont utilisées en entrée des modèles climatiques, mais il n'y a pas de rétroaction du changement climatique sur la prévision économique.

ii. Dans un second niveau d'approche, on incorpore dans les modèles économiques des contraintes d'émissions. Des analyses de type coût-efficacité permettent alors de comparer les coûts des réductions des émissions par rapport à un scénario de référence sans politique, ou sans politique nouvelle. Finalement, des analyses de type coût-bénéfice fournissent une comparaison des coûts de réductions et des estimations de coûts évités des dommages liés aux impacts du changement climatique.

iii. Les modèles intégrés économie/environnement permettent de prendre en compte directement au cours de la simulation une rétroaction des dommages dus au changement climatique sur le comportement de l'économie, mais ce gain en intégration se fait aujourd'hui au détriment d'une perte en finesse de description.

Une articulation intégrée efficace entre modèles climatiques et économiques suppose probablement la mise au point de modèles simplifiés des deux types, calibrés sur le comportement des grands modèles, et permettant d'explorer une grande variété de scénarios. Mais il y a là une contradiction non résolue et qui explique sans doute en très grande partie la lenteur des progrès dans ce domaine. Elle tient au fait que la plupart des impacts des changements globaux en retour sur l'économie ne peuvent être pris en compte qu'à partir d'une analyse à l'échelle régionale ou infra-régionale tant pour le climat que pour l'économie : que l'on pense par exemple aux impacts sur l'agriculture en zone aride, ou sur les stations de sports d'hiver de moyenne montagne ...

4. Points forts et limites des différents modèles économiques :

En général, les évaluations de coûts des politiques environnementales s'avèrent sensiblement plus élevés dans les modèles d'équilibre sectoriel de simulation/projection que dans ceux d'optimisation. Cet écart est lié aux différences de méthodologie adoptés dans les deux types de modèles, et à leurs points forts et points faibles respectifs.

Dans la pratique, il peut s'avérer très difficile d'analyser le contenu formel des différents modèles, non seulement parce que leurs éléments constitutifs ne sont en général pas publiés, mais également parce qu'une distinction insuffisante est faite entre leur contenu formel d'un côté, et les méthodes de résolution mathématiques et numériques employées de l'autre. Par ailleurs, une partie de la différence entre les objets et possibilités des différentes approches résulte des différentes visions du monde des modélisateurs, qui les amène à choisir l'un ou l'autre type de modèle. Ces a priori sont autant une source de richesse dans l'échange que de confusion dans l'évaluation des avantages et inconvénients réels de chaque type d'approche. Néanmoins, quelques remarques d'ordre général peuvent être formulées.

L'avantage le plus significatif des modèles d'optimisation par rapport aux modèles de simulation est leur capacité à atteindre un état futur prédéfini en suivant une trajectoire temporelle optimale par rapport à des critères choisis par l'utilisateur. Mais cette performance s'obtient au prix de diverses simplifications. En particulier, l'arbitraire relatif dans le choix du taux d'actualisation conduit à une très grande variété d'estimations des coûts de mitigation et d'adaptation face au changement climatique. De plus, l'évolution dans les modèles d'optimisation se traduit par une suite d'états d'équilibre, ce qui rend difficile la prise en compte des effets retard et des boucles de rétroactions qui sont à la source des instabilités systémiques de l'économie; pour la même raison, dans les cas où des contraintes environnementales sont prises en compte dans les modèles, les nombreux délais entre causes et conséquences observés dans les systèmes naturels sont difficiles à représenter. Par ailleurs, dans la pratique, l'implémentation d'environnements d'optimisation (GAMS, par exemple) exige une linéarité d'un certain nombre de relations constitutives essentielles de ces modèles. Une partie de ces défauts peut être corrigée par l'adoption de contraintes adaptées dans le processus d'optimisation, dont le choix, la forme et la pertinence dépendent largement du savoir-faire du modélisateur.

Réciproquement, les modèles de simulation permettent plus facilement, au moins en principe, d'incorporer non-linéarités, délais et boucles de rétroaction, hystérésis, etc. Pour cette même raison, il est également plus facile en principe de les coupler avec des modèles du climat ou à d'autres

questions liées à la gestion de l'environnement telles que l'usage des sols et des ressources en eau, par exemple. Dans la pratique, ces possibilités sont partiellement obérées par la calibration des comportements économiques dynamiques sur des données économétriques historiques, dont la pertinence dans le contexte présent et futur de tension sur les ressources, de dégradation de l'environnement et de la mise en œuvre possible de politiques fortement contraignantes est difficile à apprécier. De façon générale, comme pour les modèles d'optimisation, les phénomènes économiques dynamiques sont très nettement moins bien formalisés que les phénomènes d'équilibre.

Certaines difficultés sont communes à tous les types de modèle. Par exemple, l'évaluation intrinsèque des dommages liés au changement climatique est limitée par la connaissance partielle dont on dispose, notamment en ce qui concerne les effets de seuil.

Les deux types de modèles souffrent aussi de limitations fréquemment soulignées par les chercheurs d'autres disciplines en Sciences Sociales dans la représentation du comportement des différents acteurs. Ils permettent mal de prendre en compte des changements abrupts de « régime économique », résultant par exemple de modifications profondes des institutions. Par ailleurs, sauf dans le cas des modèles intégrés environnement/énergie/économie, il n'existe en général pas de modèle associant démographie et croissance économique. Dans le même ordre d'idées, il serait important de disposer de modèles sectoriels mondiaux détaillés couplés entre énergie, agriculture, et usage de l'eau et des sols. Ce besoin pointe également vers un manque associé de bases de données historiques (et de complétude des bases existantes, telle que la base GTAP).

5. Autres directions possibles de développements futurs :

Les principes généraux de ce qui peut constituer une transition à la « soutenabilité » du développement humain sont assez bien identifiés, que ce soit dans les versions dites « fortes » ou « faibles » de la substituabilité entre ressources naturelles et artificielles. Par contre, l'application pratique de ces principes va se décliner à toutes les échelles géographiques et de gouvernance, des grands blocs continentaux aux communautés de communes. Dans les faits, les déclinaisons plus locales vont dépendre des atouts et limites à toutes ces échelles. Par exemple, si la contrainte énergétique globale ou la politique énergétique européenne amène à l'horizon des quelques prochaines décennies une relocalisation partielle des échanges économiques, les marges de manœuvre et les implications à l'échelon des régions européennes apparaît actuellement sous-exploré.

Ces échelles (des blocs continentaux jusqu'aux échelles locales) sont au mieux très mal prises en compte dans les modèles économiques comme dans les modèles climatiques, et un effort spécifique de modélisation sur ce point semble nécessaire, en coordination avec l'important effort de modélisation à l'échelon européen déjà en cours. Par exemple, la mise en œuvre par un nombre croissant d'agglomérations de plans climats territoriaux devrait se traduire dans un futur très proche par l'émergence de nouveaux types de modèles, permettant en particulier d'étudier la dimension économique des stratégies d'adaptation et de mitigation à ces échelles géographiques.

Quelques références:

La littérature sur les types de modèle brièvement évoqués plus haut est plus que foisonnante. Seules quelques références introductives sont données ici. Les liens donnent accès à des références décrivant les modèles et leurs résultats.

Sur les modèles climatiques :

Donner L.J. et Large W.G., « Climate Modeling». Annual Reviews of Environment and Resources, 33, 1-17, 2008.

Sur les modèles économie/énergie/climat :

Dahan A. (ed.), «Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques». 2007, Editions La Découverte.

Les modèles TIMES, MARKAL et GEM-E3 sont largement documentés sur le web :

<http://www.etsap.org/documentation.asp>

<http://www.gem-e3.net/themodel.htm>

Le modèle IMACLIM est développé au CIRED :

<http://www.imaclim.centre-cired.fr>

Le modèle POLES est développé au LEPII :

<http://webu2.upmf-grenoble.fr/iepe/Recherche/Rech5.html#recherche>

Sur les grands modèles intégrés Economie/Energie/Environnement :

La parution du rapport du Club de Rome dans les années 1970, basé sur le modèle WORLD3, a lancé un débat qui se poursuit de nos jours. La dernière version de ce modèle est présentée et discutée dans

Meadows D., Randers J. et Meadows D., «Limits to growth, the 30-year update», 2004, Chelsea Green Publishing Company

Ce modèle a donné lieu à divers autres modèles intégrés mais désagrégés, dont le modèle IMAGE en Europe:

<http://www.pbl.nl/en/themasites/image/index.html>

WORLD3 a été très critiqué par les théoriciens de l'économie, notamment Nordhaus, concepteur du modèle DICE :

<http://nordhaus.econ.yale.edu>