



HAL
open science

Modélisation globale avec composantes biogéophysiques & économiques

Chantal Le Mouël

► **To cite this version:**

Chantal Le Mouël. Modélisation globale avec composantes biogéophysiques & économiques : Note pour le groupe d'exploration du métaprogramme GloFoodS. [0] 2013, 10 p. hal-02810106

HAL Id: hal-02810106

<https://hal.inrae.fr/hal-02810106>

Submitted on 6 Jun 2020

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.

Modélisation globale avec composantes biogéophysiques & économiques

Note pour le groupe d'exploration du métaprogramme GloFoodS

Réunion du 12-13 février 2013

Chantal Le Mouël, SAE2

Dans ce qui suit, on entend par « modélisation globale avec composantes biogéophysiques et économiques », l'activité de développement et d'exploitation de modèles couvrant le monde dans son ensemble, décrivant le fonctionnement de processus biologiques, géologiques ou physiques en interaction avec le fonctionnement des économies et des marchés nationaux et internationaux.

Le métaprogramme GloFoodS s'intéressant à la sécurité alimentaire mondiale, les processus biogéophysiques qui nous intéressent sont ceux qui sont reconnus comme déterminants au regard de la production agricole et alimentaire et de sa durabilité dans le long terme. De la même façon, au sein des économies, les secteurs et marchés qui nous intéressent sont ceux les plus étroitement liés à la production et à la consommation de matières premières agricoles et de produits alimentaires.

Il n'est pas besoin d'entreprendre une analyse approfondie de la littérature pour découvrir qu'il n'existe pas de modèle mondial présentant une couverture de l'ensemble des processus biogéophysiques en interaction avec l'intégralité des secteurs et marchés qui sont essentiels au regard de la sécurité alimentaire mondiale.

Une telle analyse de la littérature révèle toutefois qu'il existe pléthore d'outils privilégiant telle ou telle dimension selon leurs finalités. Au risque d'être caricatural, on peut distinguer deux grandes catégories d'outils : les modèles d'évaluation intégrée pour l'analyse des politiques d'adaptation au/mitigation du changement climatique ; les modèles de marchés et d'échanges pour la projection des disponibilités et des besoins alimentaires et l'évaluation de l'impact de différents facteurs (dont en particulier les politiques) en termes de sécurité alimentaire mondiale.

Le premier type de modèle vise à représenter les interactions entre l'activité humaine et le climat. Il repose donc sur le couplage, plus ou moins complet, de plusieurs modules représentant les processus qui déterminent le climat (modèle de climat) du côté de la dimension biogéophysique et de plusieurs modules représentant les mécanismes qui déterminent l'activité humaine (modèle de marchés, souvent de type équilibre général calculable) du côté de la dimension économique. Ces modèles considèrent l'agriculture de manière plus ou moins détaillée selon leur finalité mais, dans tous les cas, ils intègrent un module « usage des terres » dont le rôle est central dans le modèle de climat.

Le deuxième type de modèle vise à représenter le fonctionnement des économies nationales interagissant entre elles via les échanges internationaux. Dans ce type de modèles, ce sont les prix qui président aux mécanismes d'allocation des facteurs de production (terre, travail, capital) entre secteurs, aux mécanismes d'offre et de demande de biens et services et aux mécanismes d'équilibrage des échanges internationaux. Ces modèles s'intéressent à la sécurité alimentaire mondiale, ils considèrent l'agriculture de manière détaillée. Au sein de ce

type de modèles, beaucoup n'intègrent que la composante économique. La tendance récente est toutefois à l'amélioration de la prise en compte des contraintes biogéophysiques et de leur impact du côté de la production agricole d'une part, des mécanismes d'allocation de la terre entre différents usages d'autre part.

La première partie de cette note décrit brièvement les deux types de modèles évoqués ci-dessus. La deuxième partie recense les principaux travaux internes à l'INRA, qui pourraient constituer les briques d'un modèle global avec composantes biogéophysiques et économiques, que ce dernier soit développé à l'INRA ou ailleurs. La troisième partie propose des pistes de recherche en matière de modélisation globale que pourrait porter le métaprogramme GloFoodS.

1. Modélisation globale processus biogéophysiques et mécanismes économiques : Les initiatives existantes

C'est la question du changement climatique qui, au cours des années 80, a impulsé le développement des modèles d'évaluation intégrée (cf., Dowlatabadi et Morgan, 1993 ; Weyant et al., 1996, par exemple, pour une définition et une caractérisation de ce que l'on entend par modèle d'évaluation intégrée). Depuis lors, il existe plusieurs dizaines de modèles en vigueur qu'il est difficile de présenter ici en détail. Le lecteur intéressé peut se reporter à l'article de Goodess et al. (2003), joint à cette note, qui propose une revue et une comparaison des outputs des modèles de climat (i.e., de la façon dont est décrit le climat futur) dans les principaux modèles d'évaluation intégrée. Ce faisant, cet article fournit un tableau présentant ces modèles et certaines de leurs caractéristiques. Le lecteur peut également se reporter à l'ouvrage de Rash (2012) qui propose un état de l'art sur les méthodes de modélisation et les modèles pour l'évaluation intégrée du changement climatique. Nous nous contentons, dans le paragraphe suivant, de décrire très brièvement 4 de ces modèles, qui ont été retenus car ils donnent une place et un rôle important à l'agriculture.

Les modèles de marchés et d'échanges sont également nombreux et divers dans la mesure où ils ont été développés pour répondre à des questions différentes. Il n'est pas possible non plus de les décrire tous et le lecteur intéressé peut se reporter à l'annexe de cette note qui propose une description de 12 modèles dont 6 externes à l'INRA et parmi les plus intensivement utilisés. Nous nous contentons, dans le deuxième paragraphe de cette section, de revenir plus en détail sur 3 de ces modèles, dont certaines caractéristiques et/ou utilisations les rapprochent des modèles précédents d'évaluation intégrée.

Nous terminons cette section en ouvrant sur l'initiative AgMIP (The Agricultural Model Inter-comparison and Improvement Project) qui rassemble modèles de climat, modèles de croissance des plantes et modèles de marchés et d'échanges afin de les faire travailler et évoluer ensemble dans une optique d'exploration des facteurs et des conditions de la sécurité alimentaire mondiale en contexte de changement climatique.

1.1. Quatre modèles d'évaluation intégrée

Le graphique ci-dessous, issu de Dimaran et Mendelsohn (2011), représente de manière très simplifiée les interactions entre les différents modules usuels d'un modèle d'évaluation intégrée. Il montre le rôle clé du module usage des terres qui interagit avec l'ensemble des autres modules. L'agriculture étant un usage majeur de la terre (avec la forêt), cette activité est donc également un élément essentiel de la problématique du changement climatique : en tant

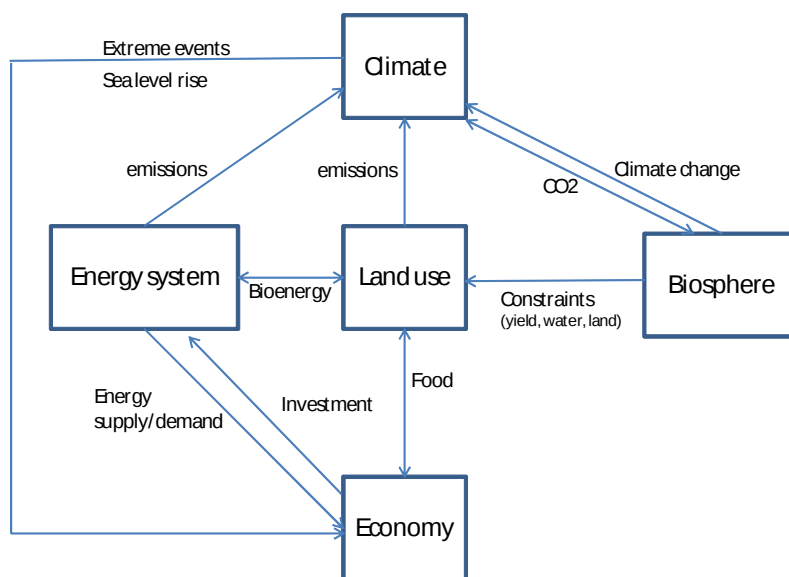
que contributeur mais également en tant qu'activité potentiellement la plus impactée par ce changement.

C'est probablement la raison pour laquelle les modèles d'évaluation intégrée s'efforcent de représenter l'activité du secteur agricole et les mécanismes (économiques ou non) qui déterminent l'allocation de la terre entre ses usages alternatifs, dont l'usage agricole (et la forêt).

On retrouve ce rôle clé de l'agriculture et de son usage de la terre vis-à-vis de la question de la sécurité alimentaire mondiale. Ceci explique également que les modèles de marchés et d'échanges se sont eux aussi efforcés ces dernières années de mieux représenter les mécanismes d'allocation de la terre, au sein des secteurs agricoles d'une part, entre usage agricole, forêt et autres usages d'autre part.

Il en résulte que la modélisation de l'usage des terres, du changement d'affectation des sols et de la forêt (LULUCF en anglais) constitue certainement une voie d'amélioration des modèles globaux actuels, qu'ils soient d'évaluation intégrée ou de marchés et d'échanges. La meilleure prise en compte de l'artificialisation des sols, qui constitue un usage alternatif dont le poids s'accroît, en particulier dans les économies développées et émergentes, et des mécanismes qui président à cet usage alternatif constitue sans doute une ligne d'ouverture et d'originalité par rapport aux travaux de modélisation globale existants.

Les interactions entre le module usage des terres et les autres modules d'un modèle d'évaluation intégrée



Source : Dimaran et Mendelsohn (2011)

Nous décrivons brièvement ci-dessous 4 modèles d'évaluation intégrée qui représentent de manière plus ou moins détaillée l'agriculture et l'usage des terres.

IMAGE (Integrated model to assess the Global Environment,
<http://www.pbl.nl/en/themasites/image>)

Le modèle IMAGE relie la demande et l'offre agricoles de 24 régions du monde à un ensemble de variables environnementales définies sur un maillage spatial de résolution fine. Le modèle

considère 7 cultures et 4 types d'élevage. Le concept de zone agro-écologique (AEZ en anglais) est utilisé pour déterminer la productivité des cultures pour différentes « qualités » des milieux (conditions agro-pédo-climatiques). Le module d'usage des terres est initialisé en utilisant des données satellitaires et les données plus agrégées de la FAO. La demande, l'offre et les échanges de produits agricoles sont représentés via un modèle économique d'équilibre général calculable (LEITAP, variante de GTAP, cf. ci-après). L'évolution des productivités est supposée exogène. Le modèle économique, défini à un niveau géographique très agrégé, et le module d'usage des terres, défini à un niveau spatial très désagrégé, sont reliés via un couplage que l'on peut qualifier de très « léger ». C'est une règle ad-hoc qui réalise le passage entre modèle économique et module d'usage des terres : si la demande de produits agricoles ne peut être satisfaite, étant donné la situation initiale décrite dans le module d'usage des terres, alors ce dernier est « résolu » en augmentant la surface de terre de qualité adaptée à la production du ou des produits agricoles concernés.

Cet exemple illustre parfaitement le problème du couplage du module économique, défini et adapté pour une nomenclature géographique agrégée, aux modules biogéophysiques, définis et adaptés sur un maillage spatial très fin. Il y a dans le modèle IMAGE une vraie rupture entre ce que peut dire le modèle économique quant à l'impact des prix et des équilibres de marchés en termes de changement d'affectation des sols et ce que peut dire le module d'usage des terres. On sent bien ici que cette rupture se cristallise autour des productivités des facteurs et intrants de la production agricole, productivités qui sont exogènes dans le module d'usage des terres et endogènes (i.e., sensibles aux prix) dans le module économique. Cette question de l'évolution conjointe des productivités et des surfaces et du caractère endogène ou exogène de l'évolution des productivités reste une limite des modélisations actuelles. C'est cette même question qui cristallise les débats autour de l'impact du développement des biocarburants en termes de changement d'affectation des sols.

GCAM (Global Change Assessment Model, auparavant MiniCAM, <http://www.globalchange.umd.edu/models/MiniCAM.pdf>)

Le modèle GCAM est constitué d'un module global économie-énergie-agriculture-usage des terres et d'un ensemble de modules qui permettent de représenter le cycle du carbone (terre et océan) et le climat. Le module global économie-énergie-agriculture-usage des terres est un modèle d'équilibre partiel récursif dynamique. Le monde est désagrégé en 14 zones. L'agriculture produit 9 cultures et les outputs issus de 5 types d'élevage. Le modèle représente les offres des secteurs agricole, énergétique et forêt, les demandes en terre (et en autres facteurs et intrants) de ces secteurs, l'offre de terre à ces secteurs et les demandes dérivées et finales adressées à ces secteurs. Les offres et les demandes pour les secteurs agriculture, forêt, énergie et pour la terre s'équilibrent sur les marchés des différents biens concernés via les prix. Ainsi, dans le modèle GCAM, l'allocation de la terre entre les différents usages se fait via les rentes foncières.

Dans le modèle GCAM, ce sont bien les mécanismes économiques qui président à l'allocation de la terre entre différents usages. Bien sûr, on peut imaginer que les contraintes biogéophysiques qui différencient les « qualités de terre » et limitent leur productivité selon les usages sont moins bien représentées que dans le modèle précédent.

La question de l'évolution des productivités des facteurs (et notamment de la terre) reste posée dans le modèle GCAM puisque ces productivités sont exogènes au modèle. En d'autres

termes un des facteurs essentiels au regard de l'évolution des effets de l'activité humaine sur le climat (et inversement) reste extérieur au modèle.

IGSM (Integrated Global System Model,
http://www.globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC_Rpt124.pdf)

Du point de vue du module économique, le modèle IGSM adopte la même philosophie que le modèle GCAM ci-dessus. Les 2 modèles se différencient toutefois sur 2 points : IGSM intègre un modèle d'équilibre général calculable récursif dynamique (calibré sur la base de données GTAP); le secteur agricole ne considère qu'une culture agrégée et un élevage agrégé.

REMIND-MagPIE-LPJmL

(<http://www.pik-potsdam.de/research/climate-impacts-and-vulnerabilities/models>)

Le modèle d'évaluation intégrée du Postdam Institute for Climate Impact Research (PIK) est, dans l'esprit, assez proche du modèle IMAGE. Le couplage entre le modèle économique et le module d'usage des terres est toutefois plus fort ici. Par ailleurs, alors que dans IMAGE la productivité des cultures pour différentes « qualités de terre » est calculée à l'extérieur du modèle, ici elle est simulée via le module de croissance des plantes LPJmL.

Le couplage entre le modèle économique et le module d'usage des terres fonctionne de la manière suivante : le modèle économique (qui fonctionne en équilibre partiel) détermine les quantités offertes et demandées par région. Le module d'usage des terres considère les productivités des différents produits issues de LPJmL sur le maillage spatial fin considéré et, étant donné les conditions et les contraintes régionales foncières et en termes d'eau, calcule un coût de production pour chaque produit. Sachant les quantités demandées par région, le module d'usage des terres minimise le coût total de production.

Au total, ces 4 exemples suggèrent :

- qu'il existe un grand écart entre les échelles auxquelles les modèles économiques et les modèles biogéophysiques sont adaptés pour apporter des éléments de réponse à la question du changement climatique ;
- que ce grand écart rend très difficile un couplage « fort » entre ces modèles ;
- que la terre et son allocation entre différents usages est au cœur de la problématique et que les modélisations en cours travaillent à améliorer la représentation de ce phénomène ;
- que les solutions proposées jusqu'à présent sont encore peu satisfaisantes, à la fois d'un point de vue économique et biotechnique.

1.2 Trois modèles de marchés et d'échanges

Comme dans le cas des modèles d'évaluation intégrée, il existe des dizaines de modèles de marchés et d'échanges en vigueur aujourd'hui, dont certains sont intensivement utilisés pour projeter les disponibilités et les besoins alimentaires à l'horizon 2030 ou 2050 (cf. annexe). Parmi ces derniers, nous en avons retenu 3 qui s'efforcent d'intégrer les contraintes

biogéophysiques dans leurs mécanismes d'arbitrage économique de l'allocation de la terre entre usages alternatifs.

GLOBIOM (A Global Model to Assess Competition for Land Use between Agriculture, Bioenergy and Forestry, <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/modelsData/GLOBIOM/GLOBIOM.en.html>)

Comme son nom l'indique, GLOBIOM est un modèle d'allocation de la terre entre les usages agricoles, bioénergies et forestiers. C'est un modèle d'équilibre partiel, dynamique récursif qui couple un module économique (offres, demandes, importations, exportations, équilibre des marchés et prix des produits issus des 3 secteurs considérés) un module de croissance des plantes (EPIC) et un module forêt (G4M).

Il est, dans son principe, assez proche du modèle du PIK : productivités des cultures, sous différentes contraintes et différents itinéraires techniques, simulés pour différentes qualités des milieux (désagrégation spatiale fine en zones homogènes sur le plan des conditions agro-pédo-climatiques) à l'aide du modèle EPIC ; productivités et profitabilités de différents types de gestion des forêts, simulés pour différentes qualités des milieux à l'aide du modèle G4M ; module d'allocation de la terre entre différents usages sur la base d'un arbitrage économique entre profitabilités relatives des différents usages.

C'est sans doute, au niveau mondial, le modèle d'allocation de la terre le plus élaboré, même s'il peut être encore amélioré du côté de la représentation de la demande et des échanges.

Les principales caractéristiques du modèle et un exemple de ses possibilités de simulation (ici l'impact des scénarios du Millenium Ecosystem Assessment) sont fournis dans Schneider et al. (2011), joint à cette note.

MIRAGE-Biof (<http://www.mirage-model.eu/miragewiki/index.php?title=Accueil>)

MIRAGE est un modèle d'équilibre général calculable initialement développé au CEPPII (Centre d'Etudes Prospectives et d'Information Internationale, Paris) pour analyser et évaluer les impacts économiques de réformes des politiques commerciales dans différents pays et zones du monde. Le modèle est par conséquent très élaboré dans le domaine de la représentation des échanges et des politiques commerciales.

Plusieurs variantes de MIRAGE ont par la suite été développées dont la version MIRAGE-biof, spécifiquement dédiée à l'analyse des effets du développement des biocarburants dans différentes régions du monde sur les marchés, les échanges et les prix et en termes de changement d'affectation des sols. Cette version intègre une représentation détaillée du secteur de l'énergie, en concurrence avec le secteur des biocarburants, et améliore largement la version initiale en ce qui concerne les mécanismes d'allocation de la terre entre différents usages.

Ici, comme dans GCAM et comme dans la plupart des modèles d'équilibre général calculable, ce sont les rentes foncières qui président à l'allocation des terres disponibles entre les différents usages considérés (cultures et élevage dans le secteur agricole, forêt). Dans ce type de modèles toutefois, et contrairement à l'approche adoptée par GLOBIOM par exemple, l'hétérogénéité des milieux et les contraintes qu'ils impliquent vis-à-vis des différents usages agricoles ne sont pas pris en compte explicitement. Cette hétérogénéité et ces contraintes sont représentées de manière très implicite via les technologies de production agricole spécifiées et

calibrées, d'une part, et en considérant une certaine hétérogénéité du facteur terre, qui se traduit par une mobilité plus ou moins imparfaite entre les usages alternatifs, d'autre part. Toute la difficulté est ensuite, lors de la phase de calibrage du modèle, de donner une (ou plusieurs) valeur(s) aux paramètres des technologies de production, d'une part, au degré de mobilité de la terre, d'autre part. En outre, l'espace étant absent de ce type de modèle, le passage entre changement d'affectation des sols et impacts environnementaux est très difficile : il ne se fait qu'au prix d'hypothèses simplificatrices et restrictives très fortes.

Un avantage de ce type de modèle en revanche réside dans le fait que la spécification explicite des technologies de production assure une totale cohérence entre évolution des surfaces et évolution des productivités des productions.

GTAP (Global Trade Analysis Project,
<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/default.asp#2>)

Le modèle GTAP a été initialement développé à l'université de Purdue pour analyser et évaluer les impacts des politiques agricoles et commerciales sur les marchés et les échanges de produits agricoles et alimentaires. Ce modèle d'équilibre général, de facture classique, a la particularité d'être un projet collaboratif qui a bénéficié de la contribution d'un grand nombre d'équipes de recherche et a été largement diffusé et utilisé à travers le monde. Il existe ainsi de nombreuses variantes du modèle (dont LEITAP et GTAPEM, par exemple) qui ont été utilisées pour étudier une large palette de questions. En outre, la base de données du modèle, qui est facilement accessible, est probablement une des sources les plus utilisées par les autres modèles économiques existants.

Comme dans le cas de MIRAGE ci-dessus, les derniers développements de GTAP visent à contribuer au débat sur les effets du développement des biocarburants en termes de changement d'affectation des sols, et l'approche adoptée est similaire.

Au-delà, et c'est le point le plus important ici, le promoteur de GTAP, T. Hertel, a récemment lancé un nouveau projet GEOSHARE qui, sur le modèle collaboratif du projet GTAP, vise à mettre en cohérence des données issues de différentes sources et construire une base de données, à couverture globale, sur l'agriculture, l'usage des terres et l'environnement (cf. Hertel et al., 2012, joint à cette note). Cette base de données pourra être le point de départ de travaux d'élargissement et d'amélioration du modèle GTAP (meilleure prise en compte des contraintes biogéophysiques dans le modèle économique d'une part, construction d'indicateurs environnementaux et intégration dans le modèle économique, d'autre part), voire du développement de nouveaux modèles.

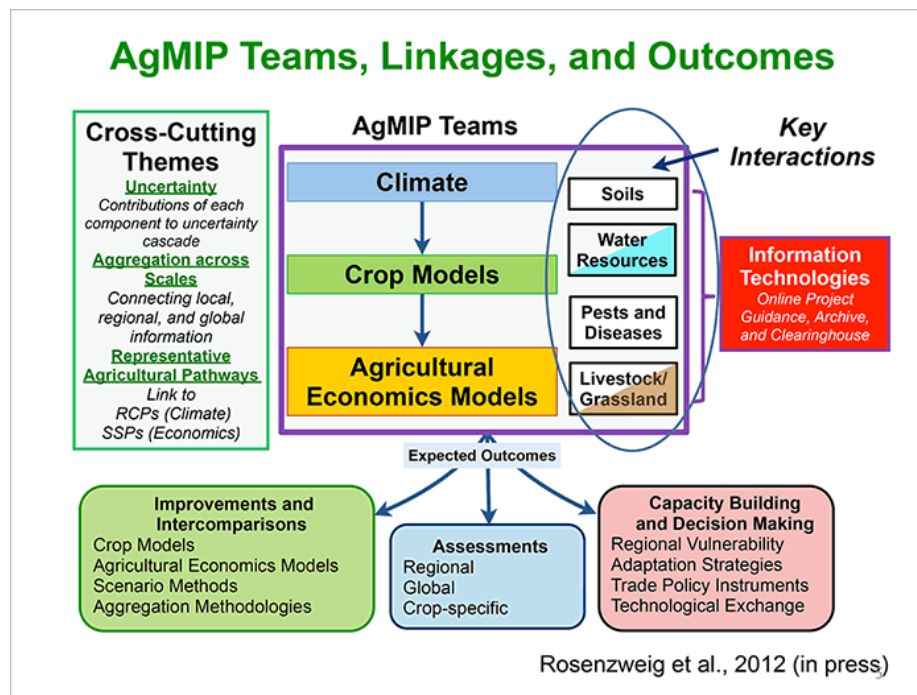
Au total, ces 3 exemples suggèrent que :

- via la représentation des mécanismes d'allocation des terres entre usages alternatifs, les modèles de marchés et d'échanges s'efforcent de mieux prendre en compte les conditions et les contraintes biogéophysiques qui s'imposent à la production agricole dans les différentes zones du monde ;
- cet effort est très consommateur en données et nécessite une mise en cohérence des données issues des nombreuses bases (nationales et internationales) existantes ;
- il faudra trouver « un juste milieu » entre raffinement de la représentation des conditions et des contraintes biogéophysiques et souplesse de la représentation des

mécanismes économiques d'allocation des terres entre usages alternatifs : l'approche idéale reste à découvrir ;

1.3. L'initiative AgMIP

Le graphique ci-dessous illustre les objectifs de l'initiative AgMIP (The Agricultural Model Inter-comparison and Improvement Project, <http://www.agmip.org/>) : rassembler la communauté des modélisateurs du climat, des cultures et de l'économie pour améliorer les modèles de cultures et les modèles économiques et produire une nouvelle génération de projections des impacts du climat sur l'agriculture dans une optique d'analyse des conditions de la sécurité alimentaire mondiale.



[A compléter sur les promoteurs de cette initiative, les modèles qui participent et les outputs]

2. Les travaux de modélisation internes à l'INRA

[A FAIRE]

SAE2

Modèles : AROPAJ (plutôt changement climatique) ; MATSIM-LUCA (plutôt sécurité alimentaire)

Projets : ANR ORACLE ; FP7 FoodSecure ; INRA-CIRAD Agrimonde-Terra

Autres départements

3. Les pistes de recherche pour le métaprogramme GloFoodS

3.1. Modélisation de l'allocation de la terre entre usages alternatifs

- Trouver la bonne façon d'intégrer conditions et contraintes biogéophysiques et mécanismes économiques : utiliser les données spatiales d'usages et de couvertures

des sols ; les données sur les zones homogènes en termes de conditions agro-pédo-climatiques ; les résultats de simulation des modèles de cultures ; les résultats de simulation de modèles d'élevage pour calibrer les technologies de production et les degrés de mobilité de la terre dans les modèles économiques ?

- Quid des usages forestiers ?

- Ouvrir sur les autres usages : artificialisation ; récréation ?

3 .2. Risques, anticipations, dynamique

- Représentation des évènements extrêmes dans les modèles de climat
- Représentation des anticipations des agents et de leurs comportements face aux risques

C'est un grand chantier dans le domaine de la modélisation économique globale : les modèles d'équilibre général calculable considèrent implicitement un horizon de long terme puisque partant d'une situation initiale où tous les marchés sont en équilibre, ils sont résolus pour une situation finale où, après un choc, tous les marchés sont revenus à l'équilibre. Dans ce type de modèle, ce sont les tendances qui ont du sens plutôt que les perturbations conjoncturelles. C'est pourquoi très peu de modèles globaux intègrent cette dimension du risque et des anticipations des agents.

L'actualité récente des marchés agricoles a remis au goût du jour les questions d'instabilité des prix et du rôle de l'Etat et des politiques publiques. On voit donc poindre des initiatives qui tendent à introduire les risques, les anticipations et les comportements face aux risques des agents dans les modèles de marchés et d'échanges, qu'ils soient d'équilibre partiel ou général.

Références

Dimaran, A., Mendelsohn, RO. (2011). Handbook on climate change and agriculture. Edward Elgar Publishing, 515p.

Dowlatabadi, H., Morgan, MG. (1993). Integrated assessment of climate change. Science, 259: 1813–1932.

Goodess, CM., Hanson, C., Hulme, M., Osborn, TJ. (2003). Representing climate and extreme weather events in integrated assessment models: A review of existing methods and options for development. Integrated Assessment, 4(3): 145-171.

Hertel, T. et al. (2012). GEOSHARE: Geospatial open source hosting of Agriculture, Resource and Environmental data for discovery and decision making. Document OCDE, COM/TAD/CA/ENV/EPOC/RD(2012)9, Paris.

Raush, PJ. (2012). Climate change modeling methodology. Springer, 337p.

Schneider, UA., Havlik, P., Schmid, E., Valin, H., Mosnier, A., Obersteiner, M., Böttcher, H., Skalsky, R., Balkovic, J., Sauer, T., Fritz, S. (2011). Impacts of population growth, economic

development and technical change on global food production and consumption. *Agricultural Systems*, 104: 204-215.

Weyant, J., Davidson, O., Dowlatabadi, H., Edmonds, J., Grubb, M., Parson, E.A., Richels, R., Rotmans, J., Shukla, P.R., Tol, R.S.J. (1996). Integrated assessment of climate change: an overview and comparison of approaches and results. In "Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change". Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Bruce, J.P., E.F. Haites, and H. Lee (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 367-396.