

**PROGRAMME DE RECHERCHE « GESTION ET IMPACTS
DU CHANGEMENT CLIMATIQUE »**

Convention MEDIAS 10/99

*Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques
et des politiques de précaution*

CIREN, LMD, SMASH

Rapport de synthèse

juillet 2002

Responsables scientifiques :

Jean-Charles Hourcade, Directeur de recherche, CNRS, Directeur d'étude, EHESR,
Directeur, CIREN, CIREN Campus du Jardin Tropical, 45 bis avenue de la Belle Gabrielle,
94 736 NOGENT-SUR-MARNE CEDEX

Hervé LeTreut, Directeur de recherche, CNRS, Directeur, LMD,
LMD, 4 place Jussieu, Boîte 99,
75 252 PARIS CEDEX 05

A. INTRODUCTION : Cadrage scientifique et objectifs du projet

Après les travaux pionniers de Nordhaus, de nombreux travaux se sont développés sur une base interdisciplinaire pour construire des modèles d'évaluation intégrée des politiques climatiques. Ces efforts se caractérisent soit par la construction de modèles de petite taille (PAGE, FUND, DIAM, STARTS, RICE) à dominante économique avec une représentation simple du cycle du carbone et des coûts des dommages, soit par l'écriture de grands modèles intégrés par une équipe pluridisciplinaire forte avec unité de temps, de lieu et d'action, en liaison avec un réseau de spécialistes propres à chaque pays. C'est le cas pour les trois grands programmes américains (MiniCam de l'Institut Battelle, le programme Global Change du MIT, MERGE à Stanford) et, en Europe pour les modèles IMAGE et TARGETS au RIVM aux Pays-Bas et pour le modèle du PIK en Allemagne.

Une approche d'évaluation intégrée est en effet nécessaire pour informer les débats sur la distribution temporelle et spatiale des actions de précaution vis-à-vis des risques climatiques : détermination de la meilleure séquence décisionnelle (calendrier de l'action) et étude de la répartition des efforts entre les différents pays du point de vue de l'équité et de l'efficacité à long terme. Or, contrairement à la première génération de modèles économiques minimisant les coûts d'abattement des GES pour un niveau donné de réduction des émissions, on ne peut séparer ici modélisation économique et modélisation climatique. Même dans une optique coût-efficacité, il convient en effet de coupler le raisonnement sur les coûts de la prévention à une modélisation du lien émissions-concentrations pour mieux représenter la dynamique du carbone entre ses différents réservoirs (en particulier, en relation avec des modifications de l'usage des sols) et examiner plus précisément l'équilibre entre réduction des émissions et séquestration dans la biomasse et plus loin, une modélisation concentrations-variation de la température pour commencer à intégrer des éléments de justification des cibles de court et long-terme à viser. Au delà, si on cherche à débattre sur les niveaux de limitation des émissions – et ces questions vont devenir plus pressantes au fur et à mesure que la Convention Climat devient une réalité -, il est incontournable d'intégrer dans les modèles une représentation régionalisée pertinente de la vulnérabilité des écosystèmes, des activités économiques et des implantations humaines.

Dans le cadre de l'organisation de la recherche dans notre pays, nous proposons ici la première étape d'un programme de longue durée permettant la mobilisation coordonnée des réseaux de compétence existant en France pour permettre à notre communauté scientifique d'améliorer sa capacité de travail interdisciplinaire. Les équipes impliquées dans ce projet ont été en effet contactées pour participer activement à la constitution d'un réseau d'excellence européen comme un des trois pôles centraux avec le PIK et le Tyndall Centre (UK).

En ligne avec les résultats des rapports INASUD (1999), CLIMNEG (2001) et SIADCERO (2001) pour la DGXII des Communautés Européennes, nous proposons de développer en parallèle les deux approches possibles pour la modélisation intégrée à très long terme:

- des **modèles compacts** décrivant les activités humaines de façon agrégée (de un à cinq secteurs économiques), intégrant une forme réduite de la modélisation du passage émissions-concentrations-températures et une fonction agrégée des impacts. La réduction de complexité due au caractère compact de ces modèles permet une forte cohérence théorique du point de vue économique et un meilleur contrôle des résultats. La perte d'information qui en résulte est compensée par un maniement suffisamment souple pour opérer des tests paramétriques systématiques sur des variables mal connues et controversées (que ce soit dans le domaine des comportements économiques ou dans celui de la réponse du climat). Ces modèles peuvent être soit "normatifs" (recherche de la réponse

optimale au sein d'un jeu donné de contraintes et paramètres sur longue période), soit récursifs (résolution par pas de temps intégrant diverses formes d'anticipation).

- de **grands modèles intégrés** qui incorporent un grand niveau de détail à la fois sur les technologies, sur les réponses des écosystèmes et sur la régionalisation des impacts. Le modèle IMAGE, construit sur la base de l'expérience accumulée dans RAINS autour des pluies acides (Alcamo *et alii*, 1990) est un archétype de cette approche. Cette approche de modélisation intègre un ensemble important de connaissances venant de champs différents, au prix bien sûr de simplifications, et permet une première prospective des impacts régionaux. Mais, en raison de leur taille, ces modèles ne peuvent intégrer un degré de sophistication important en matière économique : en théorie, il faudrait en effet décrire les équilibres quantités-prix pour l'ensemble des flux représentés tels qu'ils ressortent des comportements dynamiques, ce qui complexifierait de plusieurs ordres de grandeur la résolution du modèle, sans parler des problèmes de données. Décrivant certains paramètres déterminants des impacts, ils ne peuvent en fait, à strictement parler fournir une évaluation économique globale des dommages et des politiques de prévention.

Le maniement parallèle des deux approches que nous proposons ici revient en fait à utiliser délibérément les modèles compacts (ici DIAM et STARTS) comme modèles d'intégration d'information en provenance de modèles développés pour répondre aux trois problèmes méthodologiques suivants :

- *le traitement de l'incertitude*: en raison du caractère chaotique du système climatique et des bifurcations possibles dans les modèles de développement (technologies, styles de consommation, aménagement spatial), il faut travailler sur des scénarios multiples et des équilibres multiples. Il convient en fait tout d'abord de séparer, parmi les diverses formes d'incertitude, celles qui sont exogènes au comportement humain et celles qui lui sont endogènes, celles qui proviennent d'un déficit de connaissances et celles qui sont intrinsèques aux mécanismes analysés ou aux modèles eux-mêmes. Sur cette base, il conviendra, par une attention forte portée aux inerties du système climatique et des systèmes économiques et techniques, aux difficultés spécifiques de traduction entre champs de connaissance et niveaux d'analyse, l'enjeu central ici étant de déterminer *quelles incertitudes importent réellement pour les décisions d'aujourd'hui*.

- *la définition d'une régionalisation des modèles* reposant sur un découpage pertinent à la fois du point de vue biogéoclimatique et économique: d'une part, dans le cas des modèles désagrégés, cette base régionale permettrait de mieux intégrer la variabilité des phénomènes climatiques à petite échelle avant d'en estimer les conséquences sur l'environnement et l'activité humaine et, d'autre part, dans le cas des modèles compacts, ce type de régionalisation est nécessaire pour cerner la répartition des impacts et évaluer la distribution géographique des coûts et bénéfices de l'action sur chaque zone, de façon plus pertinente.

-et en parallèle une réflexion sur les méthodes de la modélisation intégrée qui s'est construite selon de deux axes : d'une part autour du modèle IMAGE, dont nous avons entrepris l'expertise de certains modules, pour comprendre dans quelle mesure les grands modèles intégrés peuvent fournir des informations à destination des modèles intégrés de recherche de politique climatique optimale et d'autre part à partir du test d'une technique de couplage entre modèles (TEF- ZOOM), adapté à l'analyse des couplages et rétroactions au sein de systèmes complexes, en vue de développer des modèles simplifiés pour étudier les liens entre processus climatiques et réponses économiques. Ces problèmes méthodologiques requièrent en effet des formulations mathématiques spécifiques de raccordement de modèles, qui facilitent les études explicites des rétroactions entre les différents mécanismes climatiques, économiques et techniques mis en jeu, ainsi que des tests de sensibilités aux données exogènes et aux divers scénarios. Les compétences que l'IPSL a développées à partir de l'expérience du couplage entre les modèles de circulation générale de l'atmosphère et de l'océan ont été mises à profit pour étudier dans un premier temps l'écriture du modèle de projection macro-économique ProjTES, développé par le CIRED, dans le formalisme TEF/ZOOM.

B. RESUME DU PROJET

EQUIPES PARTICIPANTES

**Ph. Ambrosi, P. Dumas, V. Gitz, M. Ha Duong,
J.-C. Hourcade, S. Szafran, V. Journé**

**Centre International de Recherche
sur l'Environnement et le Développement
CIRED-SMASH – UMR EHESS/CNRS (8568)**

Dir: Jean-Charles Hourcade

Campus du Jardin Tropical
45 bis avenue de la Belle Gabrielle
94 736 NOGENT-SUR-MARNE CEDEX
tel : 01 43 94 73 73
fax : 01 43 94 73 70
<http://www.centre-cired.fr/>

**R. Franchisseur, J.-Y. Grandpeix, S. Hallegatte,
A. Lahellec, H. Le Treut, V. Serafini**

**Laboratoire de Météorologie Dynamique
LMD – UMR CNRS (8539)**

Dir : Hervé Le Treut

4 place Jussieu Boîte 99
75 252 PARIS CEDEX 05
tel : 01 44 27 50 15
fax : 01 44 27 62 72
<http://www.lmd.jussieu.fr/>

Ph. Ciais, P. Friedlingstein

**Laboratoire des Sciences du Climat
et de l'Environnement**

LSCE – UMR CEA-CNRS
Bât. 709, Orme des Merisiers
91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX
tel : 01 69 08 77 11
fax : 01 69 08 77 16
<http://www.lsce.cnrs-gif.fr/>

MOTS CLEFS :

modélisation intégrée, cycle du Carbone, sensibilité du climat, régionalisation, incertitude, non-linéarités

La finalité de ce programme était d'améliorer d'une part la représentation des phénomènes naturels au sein des modèles intégrés d'évaluation des politiques climatiques et d'autre part de préciser les problèmes méthodologiques posés par le traitement des dommages. Cet effort de recherche s'est logiquement accompagné d'une réflexion sur les architectures de modélisation disponibles pour le couplage de modèles climatiques et économiques.

Une première composante de ce programme s'appuie sur un modèle de contrôle optimal traitant de manière symétrique les activités de réduction des émissions de GES, de prévention de la déforestation et de séquestration de carbone dans la biomasse. Nos travaux ont débouché sur deux acquis originaux :

a) un modèle du cycle du carbone dont la partie terrestre fait explicitement apparaître les changements de surface et les dynamiques naturelles des biomes considérés, pour les quatre régions des scénarios SRES. La partie terrestre du cycle comprend deux biomes, forestier et agricole, en état de climax et des surfaces perturbées, en transition entre ces biomes à la suite d'un changement d'affectation des terres: plantation ou déforestation. Les biomes, à l'intérieur d'une région donnée, sont divisés par régime climatique et biologique: tempéré, tropical, boréal.

b) un modèle d'évolution de la température globale, pour étudier la réponse du climat à court-terme (2020-2050). Deux variables sont retenues : température moyenne sur les continents et température moyenne à la surface de l'océan. Le développement de ce module de température était nécessaire pour étudier les politiques climatiques optimales en présence de contraintes à la fois sur la hausse admissible de la température et sur son rythme d'évolution au lieu du seul niveau de concentration. Tout en s'en tenant à une approche coût-efficacité, la prise en compte de ces deux contraintes présente l'avantage de donner une valorisation implicite des dommages en termes de corridor climatique en la reliant aux études d'impacts disponibles, qui font référence à une température moyenne globale, tout en rajoutant l'effet du rythme du changement climatique, ce que les fonctions de dommages couramment utilisées ne font pas.

Un premier résultat souligne l'importance de la prise en compte des rétroactions entre émissions de CO₂, changement d'affectation des terres et cycle du carbone puisque cette prise en compte conduit à augmenter de 20 à 80 ppm en 2100 les concentrations issues des scénarios SRES, ce qui accroît d'autant l'effort d'abattement à effectuer pour respecter un niveau de concentration et renforce la nécessité de freiner la déforestation et de renforcer la séquestration dans la biomasse.

Un second résultat met en évidence l'importance de l'incertitude sur la sensibilité du climat. On montre en effet que la prise en compte de cette incertitude revient à considérer des objectifs ambitieux de réduction des émissions tant que la valeur de ce paramètre reste inconnue car elle domine les autres incertitudes. Cette incertitude accroît la valeur de l'information sur la dynamique du climat puisque symétriquement elle induit un regret économique considérable s'il s'avère *in fine* que sa valeur est basse. Notons d'ailleurs que la valeur de l'information explose à partir de 2040.

Une deuxième composante de nos travaux a porté sur l'évaluation des dommages de manière directe et non plus via des contraintes globales. Nous nous sommes spécifiquement intéressés aux non-linéarités du changement climatique : le caractère non-linéaire de certains dommages (interruption de la circulation thermohaline) est représenté dans DIAM au moyen d'une fonction de dommages à seuil, l'incertitude portant ici à la fois sur le niveau de dommages et sur la valeur du seuil.

Un premier ensemble de résultats souligne l'importance de l'introduction de seuils et de l'incertitude qui les affecte : la perspective d'une perte de consommation relativement faible (4%), mais suffisamment proche et concentrée dans le temps, peut justifier des efforts de réduction sensibles à court terme, efforts qui ne sont pas justifiés pas avec des fonctions régulières. Il importe par ailleurs de noter que la stratégie optimale est davantage sensible à la position du seuil qu'à l'amplitude du saut dans la fonction de dommages.

Comme les non-linéarités dans les dommages peuvent se produire non seulement à l'échelle globale mais aussi à l'échelle régionale (par exemple celles mises en évidence en étudiant la sensibilité de la production agricole régionale à différents degrés de changement climatique avec le modèle IMAGE), nous nous sommes concentrés sur les problèmes liés à l'agrégation des estimations régionalisées des impacts. Nous avons montré que ce calcul masque complètement les chocs potentiels dans les régions les plus vulnérables, qui sont souvent parmi les plus pauvres et pèsent donc peu de poids au regard du revenu mondial. Par ailleurs, la procédure d'agrégation telle qu'elle est pratiquée actuellement suppose l'existence de mécanismes de compensation crédibles entre régions et minore ainsi le montant des transferts à opérer. Par exemple, des ruptures très localisées au départ peuvent être largement amplifiées lorsqu'elles mettent en péril les besoins fondamentaux des populations et enclencher des phénomènes de propagation aux économies développées, relativement épargnées par les effets directs du changement climatique.

C'est pourquoi, il est nécessaire de mettre en évidence les marges d'incertitude associées aux évaluations régionalisées des dommages et de les intégrer dans le raisonnement pour éviter la tentation de faire une analyse en termes de régions gagnantes et perdantes, comme c'est le cas dans certains milieux, ce qui ouvre la porte à des controverses sans fin sur l'évaluation des dommages, controverses qui risquent de paralyser toute tentative de coordination internationale.

Nous avons donc dans un premier temps défini un découpage du globe correspondant aux exigences croisées de l'économie et des sciences de l'univers puis proposé une quantification de l'incertitude associée aux estimations régionalisées des dommages. L'hypothèse de base dans ce travail exploratoire consiste à considérer que les zones où la réponse des modèles climatiques diverge le plus sont également celles où les incertitudes sont les plus importantes. La définition de ces zones à partir d'une étude statistique de modèles climatiques reconnus (expérience CMIP1) a permis d'établir une régionalisation simplifiée. En utilisant comme mesure de l'incertitude la variabilité de la réponse régionale du climat, nous avons calculé pour chacune des régions les primes de risque associées à des dommages régionaux incertains. Nous avons montré que compte tenu de l'incertitude sur les estimations régionalisées des dommages, l'existence d'aversion au risque des populations exposées au changement climatique pouvaient les conduire à exprimer une prime de risque élevée, en particulier quand elles sont peu développées et très vulnérables (par exemple, l'Afrique et l'Asie du Sud-Est). A l'échelle globale, en revanche, la prise en compte de l'incertitude est beaucoup moins importante que les considérations d'équité qui président à l'agrégation des dommages régionaux.

Il s'agit clairement d'un travail exploratoire et la réflexion sur les paramètres climatiques à retenir pour la construction de fonctions de dommages régionalisées (température moyenne, température extrême, écart des températures, rythme du changement, précipitations...) n'en est qu'à son commencement. La troisième composante de notre programme, d'ordre méthodologique, a permis de poser les bases pour incorporer des informations en provenance des modèles climatiques et des études d'impacts dans un cadre intégré et cohérent avec la théorie économique de la décision sous incertitude : expertise et manipulation d'IMAGE, utilisation de la base CMIP, modèle du cycle du Carbone, travail sur l'incertitude sur la sensibilité du climat. Ces bases seront d'autant mieux exploitées qu'une partie de ce programme méthodologique a été consacrée au test d'une [technique de couplage entre modèles \(TEF- ZOOM\), adapté à l'analyse des couplages et rétroactions au sein de systèmes complexes, en vue de développer des modèles simplifiés pour étudier les liens entre processus climatiques et réponses économiques.](#)

Ce programme de recherche, centré sur la modélisation intégrée, a permis, résultat non négligeable, d'organiser le dialogue entre équipes de disciplines différentes ce qui constitue un atout dans la perspective de la constitution actuelle des réseaux d'excellence de modélisation intégrée européens.

C. METHODOLOGIE : Architecture de modélisation intégrée

Développement de modules, expertise et couplage de modèles

Les modèles intégrés d'évaluation des politiques climatiques sont un point de passage obligé pour clarifier les conditions sous lesquelles il est possible de satisfaire à l'objectif de la Convention Climat. Ces modèles cherchent à reproduire la chaîne causale qui va des émissions de GES aux dommages du changement climatique en réunissant dans un même cadre des connaissances issues de disciplines très variées. Cependant, la modélisation intégrée de l'effet de serre n'en est qu'à ses premiers pas et l'ensemble de la communauté scientifique est bien conscient que les imperfections des modèles utilisés jusqu'à maintenant (représentations des phénomènes eux-mêmes, nature et importance des rétroactions, mesure de l'incertitude associée à chacun des processus et ses conséquences sur les sorties du modèle) ont pu conduire à des recommandations mal assurées en matière de politique climatique.

C'est pour dépasser ces limites actuelles que nous avons conçu ce programme de modélisation intégrée. Il ne consistait pas à construire *ex nihilo* un nouveau modèle mais à utiliser des modèles d'interface entre modèles climatiques et modèles économiques pour améliorer la compréhension et la représentation des incertitudes sur le système activité humaine-environnement et par là d'en tirer un outil plus fiable pour discuter de la répartition temporelle et spatiale de l'action à très long-terme (c'est-à-dire la fin du XXI^{ème} siècle), sous le double angle de l'équité et de l'efficacité. Par ailleurs, étant donné l'importance des rétroactions au sein du système activité humaine-environnement et l'étendue des incertitudes à leur propos, notre projet comporte une dimension exploratoire : tester une technique de couplage entre modèles, adaptée à l'analyse des rétroactions au sein de systèmes complexes, à l'aide du formalisme TEF-ZOOM.

1-Des modèles d'interface entre sciences humaines et sciences de l'univers

Notre projet s'appuie donc sur une structure modulaire, construite autour des modèles DIAM et STARTS – développés au CIRED. Ce sont des modèles à commande optimale qui peuvent soit étudier les stratégies optimales sur le très long terme, sous la forme de profils d'émission optimaux à moyen terme (2000, 2020, 2040) compte tenu des hypothèses sur le très long terme (2200), soit être résolus sur un mode séquentiel pour intégrer divers jeux d'anticipation et plusieurs étapes de négociation. DIAM et STARTS peuvent être utilisés sous deux modes:

- en coût-efficacité (minimisation des coûts pour tenir un objectif donné de concentration) et
- en coût-bénéfice (évaluation de la trajectoire d'émission optimale compte tenu de l'évaluation des dommages du changement climatique).

Les encarts 1 et 2 présentent plus précisément les deux modèles.

Encart 1: *DIAM: un Modèle sur la Dynamique d'Inertie et d'Adaptabilité des systèmes énergétiques.*

DIAM est un modèle intégré évaluant les stratégies de réduction optimale des émissions de CO₂. Il se compose de trois relations intertemporelles:

La première représente le cycle du carbone atmosphérique, à l'aide d'une fonction de réponse linéaire. Celle-ci décrit la dynamique d'accumulation et de disparition à long terme du CO₂.

La seconde relation de DIAM est une fonction de coût mesurant, à chaque période, les effets sur l'économie des politiques de réductions suivies. Cette fonction a pour caractéristique d'incorporer

un coefficient d'inertie qui permet de mettre en évidence l'importance des coûts d'ajustement, compte tenu d'un risque éventuel d'accélération des politiques climatiques.

La troisième équation est la minimisation de la somme intertemporelle des coûts actualisés, sous contrainte environnementale. Lorsque cette contrainte est stochastique, le modèle est résolu par la programmation dynamique.

Encart 2: STARTS, un modèle d'optimisation sectorielle des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre (CIRED).

Le modèle STARTS (Sectoral Trajectories with Adaptation and Response Turnover of Stocks) est un modèle intégré de recherche des politiques optimales de réduction des émissions de CO₂ étant donné une fonction de dommage. L'apport principal du modèle est de prendre en compte les surcoûts liés à une réduction des émissions trop rapide, et donc à une mise au rebut prématurée du capital existant. Dans sa forme actuelle, STARTS comprend deux secteurs émetteurs de CO₂ caractérisés par des temps de rotation du capital, et donc des inerties, différentes. Le premier secteur (rigide) représente les infrastructures de transports et l'habitat. Le second (flexible) recouvre le reste des activités émettrices. Ce modèle nous a permis de mettre en évidence le rôle des différentiels d'inertie dans la répartition des efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

STARTS étudie soit des trajectoires optimales (de premier rang) à très long terme soit, de façon séquentielle, en attribuant des quotas d'émission arbitraire par pas et en calculant des stratégies adaptatives sur un marché de droit d'émission. STARTS impose alors une règle d'équilibre de ces marchés et prend en compte les impacts des transferts de capitaux associés sur le taux de croissance des différentes régions.

DIAM et STARTS appartiennent à la famille des modèles intégrés compacts : ils comportent des fonctions coûts, des fonctions dommages et des représentations simplifiées du cycle du carbone qui sont des formes réduites, écrites à partir de modèles plus complexes. Dans ce projet, nous n'avons pas procédé à l'écriture de fonctions de coûts d'abattement mais avons repris les formes réduites déjà existantes, calibrées à partir de modèles technico-économiques plus développés : les fonctions de coût que nous avons utilisées ici ont été calibrées à partir du modèle SGM (Battelle Institute). L'essentiel de l'effort a donc porté sur :

- l'amélioration de la représentation du passage émission-concentration-température en développant un modèle de cycle du carbone et un modèle d'évolution de la température à partir des modèles des sciences de l'univers,
- l'utilisation d'un modèle intégré de grande dimension, IMAGE, pour fournir des informations à destination des modèles « compacts », notamment sur les impacts du changement climatique.

1-1 Développement de modules et écriture de formes réduites

Nous avons développé les modules environnementaux des modèles DIAM et STARTS de manière à rendre compte des rétroactions climatiques sur le lien émissions-concentrations, sous-estimées jusqu'alors dans les calculs de budget carbone, et représenter de manière explicite les variations des bilans carbone en réponse aux modifications de l'usage des sols.

Pour construire ce module cycle du carbone, nous avons utilisé le modèle de végétation terrestre CASA-SLAVE (P. Friedlingstein, CEA), les données concernant les changements d'usage des sols (Houghton et al.) mises à disposition sur le site du CDIAC et les données sur les scénarios futurs

d'émission et d'utilisation des terres provenant du CDROM d'intégration des SRES par le modèle IMAGE 2.2.

Par ailleurs, nous avons construit un modèle d'évolution de la température pour étudier l'influence de la prise en compte de l'incertitude sur la sensibilité du climat sur les politiques optimales, dans un cadre coût-efficacité. Ce modèle a été calibré à partir d'une simulation du modèle de l'IPSL (fournie par P. Friedlingstein, CEA) et le module environnemental a été validé à partir des résultats des scénarios SRES, intégrés par le modèle IMAGE 2.2.

1-2 Expertise et manipulation du modèle IMAGE

Comme on peut le voir à la section précédente, le modèle IMAGE a servi de base de données. Il présente en effet le très grand avantage de comporter de très nombreuses séries de données socio-économiques (PIB par région et par secteur, population, émissions par région et par secteur, mode d'occupation des sols ...) ou environnementales (concentrations de GES, hausse de la température, éventuellement régionale, variation des précipitations, ...), mises en cohérence, régionalisées. Ces séries allient des observations de 1970 à nos jours et les résultats des exercices prospectifs menés à l'aide d'IMAGE 2.2 lors de l'intégration des scénarios SRES. L'encart 3 présente rapidement le modèle IMAGE.

Encart 3: IMAGE (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect), modèle d'évaluation intégrée des politiques climatiques (RIVM).

IMAGE 2 propose un cadre interdisciplinaire d'évaluation intégrée du changement global, en représentant de manière très détaillée le système activité humaine-biosphère-climat. Les projections effectuées par le modèle sont de nature déterministe.

On peut distinguer trois modules principaux, en étroite relation:

- le module *Energie-Industrie* calcule, pour les 13 régions du modèle, le niveau d'activité industrielle, la production et la consommation d'énergie puis les émissions de GES en réponse aux projections des scénarios exogènes sur la population et la croissance économique.

- le module *Environnement terrestre* simule les modifications de l'occupation des sols et du couvert végétal en réponse à la demande de la population, en tenant compte du changement climatique. Il estime dans un second temps les émissions de GES d'origine naturelle et les flux de carbone à l'interface biosphère terrestre/atmosphère.

- le module *Atmosphère-Océan* projette l'évolution du climat en lien avec les émissions d'origine anthropique et naturelle.

IMAGE est l'un des premiers modèles intégrés à représenter complètement le lien entre activité humaine et impacts, en modélisant concrètement, au delà des impacts sur le climat, les impacts sur les écosystèmes. En outre, il offre l'avantage de proposer une véritable spatialisation des impacts, sous forme de cartes.

En revanche, on peut lui reprocher la faiblesse de son cadre économique, l'absence de variabilité dans les résultats (due au caractère déterministe du modèle) et une paramétrisation simplifiée des phénomènes naturels qui ouvre la porte à de nombreuses couches d'incertitude dans le modèle.

L'utilisation du modèle IMAGE constituait une des demandes initiales auxquelles répondait le projet puisqu'il s'agissait d'examiner dans quelle mesure ce modèle peut fournir des informations sur

les impacts du changement climatique et aider à écrire des formes réduites à destination des modèles compacts.

Un préalable a bien entendu été l'implantation et la maîtrise du code par les équipes françaises ; ce point fait l'objet d'une note dans le rapport final. Dans un second temps, a été entreprise une expertise du modèle car sa complexité pose un problème majeur : la variété des processus pris en compte est très grande et il n'existe pas d'équation fondamentale (comme l'équation de Navier-Stokes pour les modèles de circulation atmosphérique ou océanique) qui fournisse une certaine unité conceptuelle au modèle. Cette expertise s'est concentrée autour du module climatique d'IMAGE – dont les sorties ont été comparées aux données de l'expérience CMIP1, où une dizaine de modèles couplés océan-atmosphère, dont les deux français, ont été intégrés dans des conditions strictement comparables : une augmentation du CO₂ atmosphérique de 1%. Un sous-projet d'analyse des simulations CMIP pour aider à documenter la pertinence de modèles intégrés tels que le modèle IMAGE, a été proposé et accepté par le panel CMIP, qui gère la distribution de ces résultats.

2- Test d'une technique de couplage entre modèles

Le but de ce travail est d'utiliser un formalisme permettant une étude détaillée des couplages et rétroactions entre diverses variables dans la modélisation de systèmes complexes, afin de développer des modèles intégrés simplifiés (par rapport aux modèles existant de type IMAGE) pour étudier les couplages entre processus climatiques et réponses économiques.

La première partie de ce travail a consisté à reprendre un modèle développé au CIRED, le modèle Imaclim-Proj, et à le ré-écrire dans le formalisme TEF (Formalisme d'Evolution par Transfert) en utilisant le logiciel Zoom développé par la collaboration Leseth (UPS-Toulouse) et Ramses du LMD.

Le modèle Imaclim-Proj projette, à un horizon temporel donné, un tableau économique d'ensemble (TES) à 6 secteurs (habitat, transport, énergie, pétrole, commerce et secteur composite) en utilisant divers jeux d'hypothèses sur les rythmes et structures de développement. Ce modèle projette deux types d'équilibres (équilibre des prix et équilibre des quantités) qui sont couplés par l'intermédiaire de la matrice de Léontieff (matrice des consommations intermédiaires). Le facteur déterminant de la projection du TES est la projection de la demande finale de biens et services des ménages qui se fait sur la base d'indicateurs de consommation en volume. On a recours à une fonction logistique pour la projection de la demande finale dans les secteurs de l'énergie, de l'habitat et des transports, le secteur composite étant calculé sur le reliquat.

Le TEF est une méthode de modélisation développée initialement dans le domaine des Sciences Pour l'Ingénieur, puis utilisée par l'IPSL pour le couplage Océan-Atmosphère. Il est fondé sur le concept de découpage-raccordement : c'est-à-dire que le modèle y est découpé en modèles partiels, représentant les parties du système, et en modèles d'interface, permettant le raccordement des modules. Il explicite couplages et rétroactions entre processus.

Le logiciel ZOOM permet la mise en œuvre de modèles selon ces principes et calcule les coefficients de couplage et les gains de rétroaction. Il offre la possibilité d'effectuer des analyses de sensibilité. Il a été utilisé pour un large spectre de modèles allant de l'éthologie au génie des procédés et à la climatologie. Citons, par exemple, des modèles de système de refroidissement de satellites, de cellule d'électrophorèse, de comportement d'insectes sociaux, un modèle écologique de plancton et un modèle unidimensionnel de couplage Océan-Atmosphère. Il permet la mise en œuvre de modèles de taille intermédiaire entre les modèles compacts et les modèles détaillés, allant de quelques dizaines à quelques milliers de variables. Un développement en cours permettra de disposer automatiquement du modèle adjoint de tout modèle implanté dans ZOOM, ce qui facilitera l'assimilation de données (ces travaux ont lieu dans le cadre du projet européen WAMP).

D. PRINCIPAUX RESULTATS DU PROJET

« Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution »

I Modélisation intégrée et répartition temporelle des efforts de limitation des émissions de GES dans un cadre coût-efficacité

Les travaux menés dans cette partie contournent les questions soulevées par la valorisation explicite des dommages du changement climatique et se concentrent sur l'examen de la chaîne émissions – concentrations – changement climatique.

I-1 Prise en compte des rétroactions du système climatique sur le lien émissions-concentrations : amélioration de la modélisation du cycle du Carbone

Le développement d'un modèle intégré de contrôle optimal pouvant traiter de manière symétrique les activités de réduction des émissions d'énergie fossile, de prévention de la déforestation et de séquestration de carbone dans la biomasse, rend nécessaire l'implémentation d'un sous-module du cycle du carbone dont la partie terrestre fait explicitement apparaître les changements de surface et les dynamiques naturelles des biomes considérés.

Nous avons construit un modèle du cycle global du carbone dont la partie terrestre est régionalisée (4 régions actuellement, qui correspondent au découpage géo-politique retenu pour les scénarios SRES), et qui intègre les interactions entre les changements d'usage des sols et le reste des écosystèmes terrestres. Ce modèle est destiné à s'intégrer dans une cascade de modèles couplés reproduisant la chaîne causale qui va des émissions aux dommages du changement climatique, dont le développement de certains composants était une des modalités de ce programme de recherche.

Notre modèle calcule les flux de carbone entre les différents réservoirs terrestres, l'atmosphère et l'océan, lorsque l'on applique

- (i) une perturbation due aux émissions fossiles et
- (ii) lorsque des changements d'affectation des surfaces ont lieu, par exemple la conversion de forêts à l'agriculture ou l'afforestation de pâturages.

En ce sens, les commandes du modèle sont les émissions fossiles, en GtC/an, et les changements d'usage des sols, en ha/an. Nous avons calibré le module terrestre sur le modèle CASA-SLAVE, et le module océanique sur le modèle de Bern (HILDA).

Nous avons testé le modèle forcé par les émissions passées et les changements historiques d'usage des sols, en vérifiant l'accord avec les calculs de Houghton pour les flux liés aux changements d'usage des sols entre 1700 et 1990 (*figure 1*), et le budget carbone (flux cumulés de carbone des différents réservoirs vers l'atmosphère) pour cette même période et pour la décennie 1980. Ainsi nous disposons d'un outil capable de transformer les sorties du modèle économique " concernant les changements d'affectation des terres" en émissions de CO₂, et aussi de calculer les trajectoires atmosphériques afférentes.

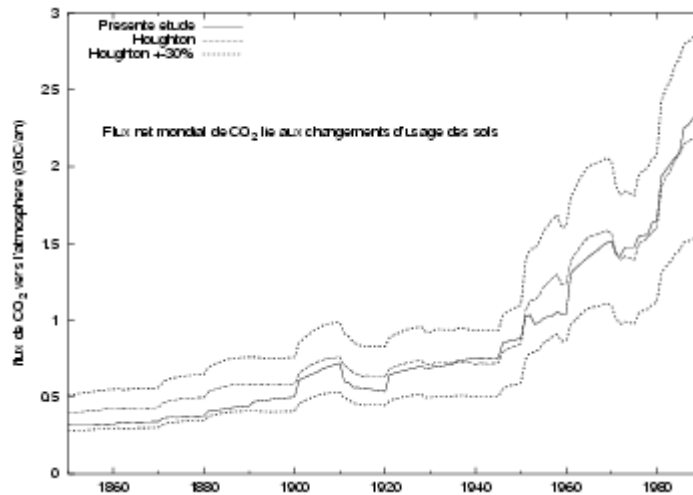


figure 1 : Flux net mondial de CO₂ lié aux changements d'usage des sols

Nous nous sommes servis de ce modèle dans un premier temps pour montrer ce que pouvait apporter l'intégration du changement d'usage des sols (LUC pour land-use change) dans un modèle du cycle terrestre du carbone. L'effet immédiat du LUC est d'émettre du carbone dans l'atmosphère, mais cet effet est amplifié par une rétroaction positive sur le CO₂ atmosphérique, qui fait que lorsque des terres agricoles ont remplacé des forêts, le temps de résidence du carbone dans la biosphère est diminué, en même temps que la capacité des écosystèmes terrestres à stocker du carbone. Cette rétroaction conduit à une réévaluation des trajectoires de CO₂ atmosphériques par rapport au cas où les émissions provenant du LUC étaient traitées comme du fossile.

Nous avons quantifié cet effet pour les quatre scénarios "marker" IPCC-SRES, qui peut atteindre 70 ppm en 2100 pour le scénario IPCC-SRES A2, ainsi que l'incertitude sur l'effet de rétroaction positive. Une telle rétroaction positive est cependant partiellement atténuée par les puits fonctionnant sur les écosystèmes non perturbés et l'océan, ce qui suggère que la conservation des forêts primaires avec des temps de résidence du carbone long pourrait contribuer efficacement aux stratégies de mitigation du changement climatique.

1-2 Incertitudes sur la sensibilité du climat : valeur de l'information et politique climatique optimale

L'analyse des trajectoires optimales des efforts de réduction des émissions de CO₂ pour des plafonds de concentration atmosphérique déterminés a été l'occasion de débat nourris autour des engagements de court-terme contenus dans le Protocole de Kyoto. D'un côté, pour un objectif fixé dès à présent, objectif dont la valeur est fonction de croyances *a priori* sur le « niveau d'interférence dangereuse avec le système climatique » (en vertu de l'objectif de la Convention Climat), les arguments socio-économiques ne manquent pas pour justifier un report des actions de quelques décennies. Cependant, cette manière de raisonner néglige le fait que l'on ignore aujourd'hui quelle est la cible ultime à viser en raison de notre connaissance encore très incertaine de l'étendue des dommages du changement climatique. Or, l'existence d'incertitude sur l'objectif de long-terme et la présence d'inertie socio-économique incitent au contraire à entreprendre plus d'efforts de court-terme dans une optique de précaution.

Nous nous proposons d'examiner l'influence du couple inertie-incertitude sur la politique climatique optimale en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat et en considérant à la fois des contraintes sur la variation de la température et sur son rythme d'évolution. « Aller jusqu'à » la température pour une approche coût-efficacité présente l'avantage de relier la valorisation implicite des dommages (formulée en termes de corridor climatique) aux études d'impacts disponibles, qui font toute référence à une température moyenne globale. Par ailleurs, on peut prendre en compte l'effet du

rythme du changement climatique (ce que les fonctions de dommages couramment utilisées ne font pas) en définissant des contraintes sur l'évolution temporelle de la température.

A cette fin nous avons construit un modèle d'optimisation inter-temporelle des politiques de réduction des émissions de CO₂ fossiles, résolu en mode coût-efficacité. Il inclut une représentation du coût des politiques climatiques (volume des émissions et coût de réduction des émissions, coût qui prend en compte l'effet multiplicateur de l'inertie socio-économique) et une modélisation de la chaîne causale qui va des émissions au changement climatique (cycle du carbone, modèle d'évolution de la température). Comme nous nous intéressons à la distribution temporelle des efforts de réduction des émissions, nous suivons uniquement une description globale de l'économie et du climat. Par ailleurs, le seul gaz modélisé est le CO₂.

L'essentiel des composants de notre modèle provient de modèles intégrés déjà existants (STARTS, DICE) à l'exception du module d'évolution de la température que nous avons construit. Il s'agit d'un module qui donne une représentation simplifiée de la machine climatique mais néanmoins adaptée à notre problématique : réponse du climat à court-terme (horizon 2020-2050). Il comprend deux compartiments, l'atmosphère et l'océan de surface, dont on suit la variation de la température moyenne depuis la période pré-industrielle. Trois mécanismes, dont la superposition permet de retracer l'évolution du système climatique, sont modélisés : le forçage additionnel atmosphérique lié à l'accumulation du CO₂ d'origine anthropique, sa modération par des mécanismes de rétroaction (majoritairement atmosphériques) et un rééquilibrage progressif avec l'océan de surface. Compte tenu de nos paramétrisations, la sensibilité du climat dépend seulement du forçage radiatif instantané associé au doublement de la concentration atmosphérique pré-industrielle de CO₂ et des mécanismes de rétroaction climatique. Dans le cadre de notre modèle simplifié, nous avons fait l'hypothèse que l'incertitude sur la sensibilité du climat provient uniquement de l'incertitude sur ces mécanismes.

Le module d'évolution des températures a été calibré à partir d'une simulation du modèle de l'IPSL et le module environnemental (cycle du carbone et équations d'évolution des températures) a été ensuite validé à partir des résultats des scénarios SRES, intégrés par le modèle IMAGE.

Nous avons d'abord entrepris une analyse de sensibilité du modèle autour de certains paramètres socio-économiques et environnementaux pour déterminer leur influence respective dans le cadre d'une approche coût-efficacité.

Dans les débats sur la « when flexibility », trois paramètres socio-économiques ont été identifiés comme déterminants-clefs de la politique climatique optimale pour un jeu donné de contraintes environnementales : il s'agit du taux d'actualisation (qui incite à reporter les efforts vers le futur plus il est élevé), du degré d'inertie socio-économique (qui conduit à échelonner dans le temps les efforts car il est coûteux de remplacer de manière prématurée le capital productif en place) et du progrès technique (qui pousse à reporter les efforts d'autant plus que son rythme est élevé). Nos résultats mettent en évidence que pour les spécifications de notre modèle, l'effet du progrès technique autonome est dominé par celui de l'inertie socio-économique, lui-même très largement dominé par le taux d'actualisation.

Nous avons par ailleurs étudié l'impact des deux contraintes environnementales (amplitude du réchauffement et rythme du réchauffement) sur la réponse optimale du modèle. La contrainte d'amplitude du réchauffement domine la contrainte de rythme limite du réchauffement pour des faibles valeurs : pour une élévation de température de +1°C, la contrainte de rythme ne s'exprime pas. A l'inverse, quand on relâche progressivement la contrainte d'amplitude du réchauffement, on constate que la contrainte de rythme s'exprime, quand elle est forte, pendant la première moitié du XXI^{ème} siècle. Pendant la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, la contrainte d'amplitude devient significative à nouveau et dirige l'évolution des abattements de long-terme : pour chaque contrainte d'amplitude, on observe une convergence progressive des niveaux d'abattement quelle que soit la contrainte sur le rythme. On retrouve à l'aide de notre modèle simplifié un résultat important des approches Safe Landing Analysis et Tolerable Windows Approach: contrôler le rythme du

changement climatique impose une contrainte importante sur les émissions pendant la première moitié du XXIème siècle.

Pour un niveau de réchauffement retenu comme objectif à long terme, l'incertitude sur la sensibilité du climat se répercute en incertitude sur les cibles de stabilisation des concentrations à respecter : par exemple, à un niveau tel que +2 °C correspond un large éventail de plafonds de concentrations qui va de 430 ppm, contrainte très stricte, à 610 ppm, contrainte plutôt laxiste. Ainsi, garantir que la température moyenne globale de surface reste inférieure à un seuil déterminé devient équivalent en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat à stabiliser à long terme les concentrations atmosphériques de GES à des plafonds inconnus.

La prise en compte de l'incertitude sur la sensibilité du climat dans l'étude des stratégies de réponse optimale revient donc à considérer des objectifs ambitieux de réduction des émissions qui impliquent des efforts importants à court terme en raison l'effet dominant d'irréversibilité environnementale (*figure 2*). La prégnance de cet effet est d'ailleurs telle que le taux d'actualisation n'est plus un paramètre déterminant en univers stochastique comme il l'est en univers certain.

Symétriquement, l'incertitude sur la sensibilité du climat accroît la valeur de l'information sur la dynamique du climat puisque elle induit un regret économique important s'il s'avère que ce paramètre prend en fait une valeur basse. On démontre d'ailleurs que la valeur de l'information explose à partir de 2040, ce qui signifie qu'il est opportun de commencer à connaître sa valeur avant cette date.

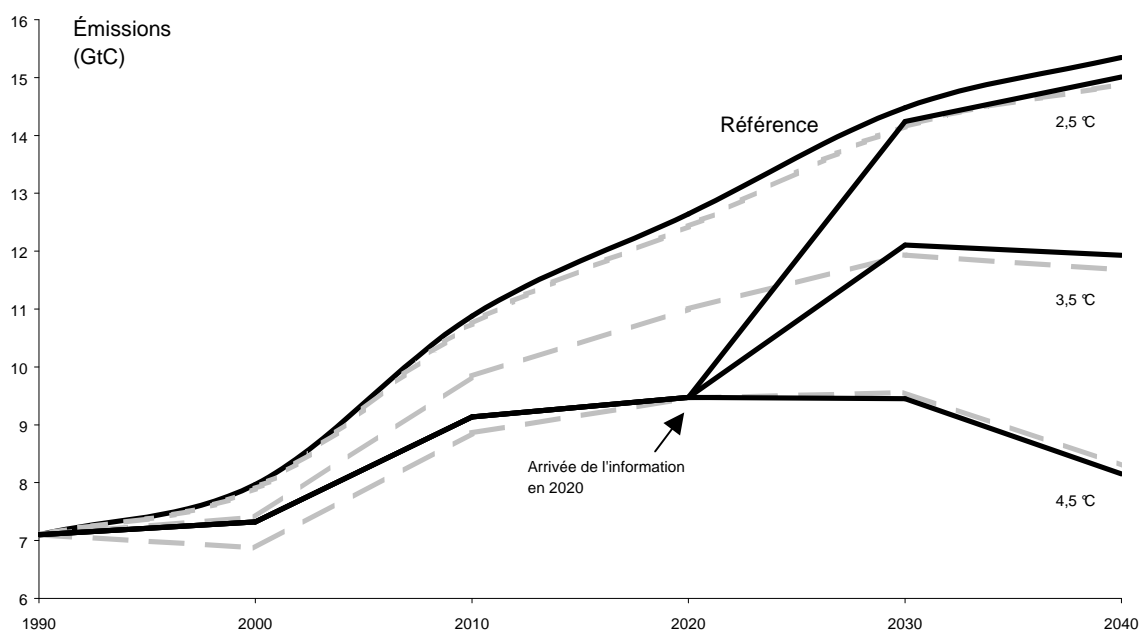


figure 2 : Stratégie optimale en décision séquentielle en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat Profils d'émissions compatibles avec une contrainte sur l'amplitude du réchauffement de 2°C: en information parfaite (courbes pointillé gris clair) et en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat avec apprentissage (courbes trait plein noir). Avant l'arrivée d'information, on peut constater que les réductions d'émissions sont très importantes et sont presque confondues avec le pire des cas. Après l'arrivée d'information, les trajectoires peuvent s'ajuster. Il existe donc un regret économique important s'il s'avère que la sensibilité du climat prend une valeur basse.

II Modélisation intégrée, incertitude et évaluation des risques climatiques dans un cadre coût-bénéfice

Une deuxième phase de nos travaux a porté sur l'évaluation des dommages pour dépasser la valorisation subjective du risque climatique en termes de contraintes et chercher à justifier le choix de telle ou telle cible. Nous nous sommes plus spécifiquement intéressés aux non-linéarités induites par les changements climatiques.

II-1 Approche séquentielle et tri des incertitudes : l'importance des non-linéarités

L'introduction de possibles non linéarités en présence d'incertitude dans un certain nombre de modèles compacts coût-bénéfice ne change pas les trajectoires optimales d'émissions, tandis que l'utilisation d'un plafond incertain en coût efficacité modifie les émissions de court-terme. Afin de déterminer si cette différence n'était pas due aux formes particulières de la fonction de dommage, une fonction de dommage à seuil incertain a été utilisée et comparée à d'autres formes de fonctions de dommages. Les comparaisons ont été faites en prenant bien garde à considérer des fonctions présentant un dommage moyen comparable de telle sorte que la comparaison se fasse bien sur la forme et non le niveau des dommages.

Pour comparer ces fonctions de dommage sous incertitude, elles ont été introduites dans un modèle compact coût-bénéfice, DIAM. Le modèle de croissance est simple puisqu'on considère uniquement la perturbation d'une trajectoire de référence sans rétroaction sur le sentier de croissance des abattements ou des dommages. L'inertie socio-économique est présente dans la fonction de coût d'abattement. Le cycle du carbone est également simple, puisqu'il s'agit d'un modèle de réponse linéaire.

L'accent est mis sur la représentation de l'incertitude et de l'apprentissage en présence de non-linéarités. Les différentes formes de fonctions de dommages sont contrastées, l'apprentissage étant modélisé par le biais d'une résolution des incertitudes pouvant avoir lieu à différentes dates. Le modèle est résolu pour ces différentes fonctions de dommage, avec des hypothèses diverses sur l'apprentissage, afin de déterminer dans quels cas la prise en compte de l'incertitude sur les non-linéarités de la fonction de dommage engendre un comportement de type précautionneux sur la décision de court terme.

Afin de déterminer l'importance de la forme de la fonction de dommage sur la décision de court terme, trois fonctions de dommage ont été comparées : linéaire, puissance et à seuil. Pour chacune de ces formes, l'incertitude peut être résolue immédiatement, en 2040-2060 ou jamais.

Trois résultats intéressants émergent de cette comparaison (*figure 3*):

1. la prise en compte des non-linéarités de type seuil sous incertitude induit une action plus vigoureuse en particulier dans le court terme,
2. plus l'incertitude sur les seuils de non linéarité est résolue tard plus il faut agir vite ; si les seuils peuvent être atteints, il faut commencer à agir un peu plus bien avant que les dommages non linéaires ne se manifestent,
3. la prise en compte de l'incertitude pour les fonctions de dommage linéaires et puissance ne changent pas la trajectoire d'émissions.

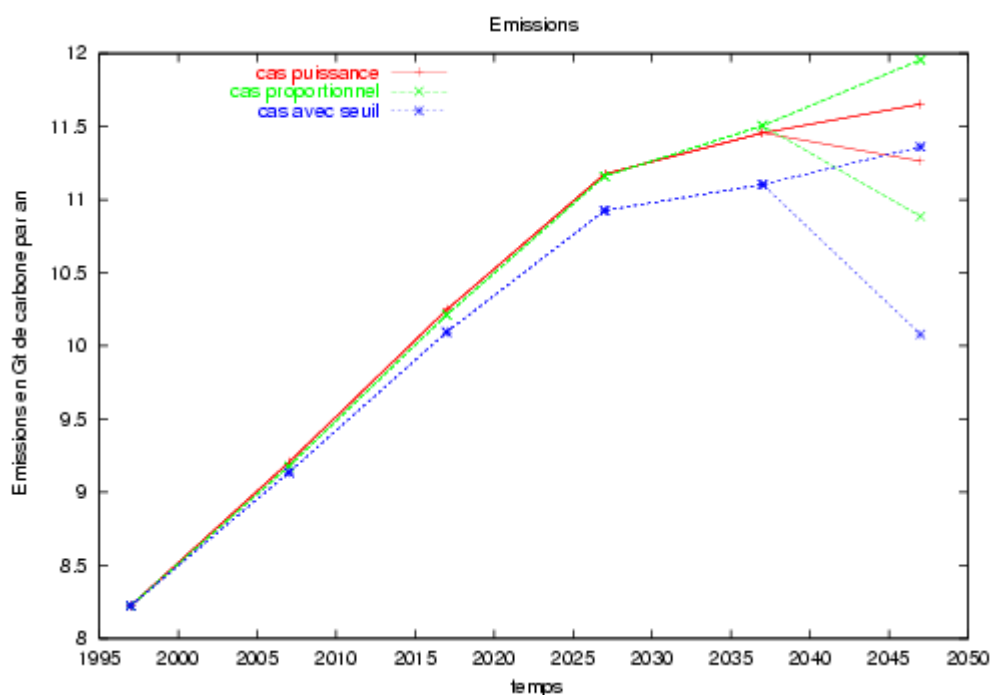


figure 3 : Stratégies optimales d'émissions pour différentes formes de fonctions de dommage. Les émissions sont réduites dans le cas de la fonction de dommages à seuil. Il y a une bifurcation des trajectoires en 2040 avec l'arrivée d'information.

Bien que les différences ne soient pas quantitativement très importantes (environ 1% d'abattement en plus en 2020), la forme de la fonction de dommage apparaît bien avoir un effet sur la décision de court terme en coût bénéfice, lorsque l'on considère une incertitude portant sur la proximité des seuils de non linéarité et que l'on n'écarte pas les possibilités de mauvaise surprise.

Dans ce cas un comportement de type précautionneux émerge de la résolution du modèle : il ne faut pas attendre que les dommages soient perceptibles pour agir plus, si on ne sait pas exactement pour quelle concentration le changement climatique deviendra plus critique, il faut commencer à agir un peu plus bien avant.

II-2 Régionalisation des dommages climatiques et incertitudes : un travail exploratoire

L'utilisation du modèle IMAGE constituait une des demandes initiales auxquelles répondait le projet. Deux exercices autour du modèle IMAGE ont ainsi été menés : une expertise du module climatique d'IMAGE – dont les sorties ont été comparées aux données de la base CMIP - et une étude de la sensibilité de la production agricole régionalisée en réponse à une modification de l'intensité du changement climatique. Pour des raisons de clarté, nous repoussons dans une partie méthodologique l'exposé de ces travaux pour présenter dans la section suivante les résultats principaux qui nous ont permis de construire une réflexion autour de l'analyse des dommages (quels sont les déterminants climatiques, environnementaux, socio-économiques clefs ?) et de leur spatialisation.

II-2-a Quelques leçons autour des exercices d'IMAGE 2.1 sur la régionalisation des dommages climatiques

La première leçon est une rare évidence qu'il est cependant nécessaire de rappeler : toute estimation des impacts régionalisés est tributaire du scénario climatique, du scénario socio-économique et des modèles d'impacts utilisés. Pour ne citer qu'un exemple, à partir d'une inter-comparaison des scénarios climatiques de l'expérience CMIP1, on peut constater que l'écart type entre les modèles, en terme de réponse de la précipitation, est souvent plus important que la réponse moyenne des modèles (ceci est particulièrement notable en janvier dans la zone Méditerranée). De même, la dispersion des résultats entre différentes évaluations des impacts régionalisés sur la production agricole, pourtant obtenus pour des hypothèses assez comparables, montre bien qu'il n'est pas raisonnable de considérer les résultats de ces études comme des prévisions déterministes. A titre d'illustration, dans l'expérience que nous avons menée à partir d'IMAGE, la Chine est très gravement touchée tandis que les estimations de Nordhaus donnent son secteur agricole bénéficiaire. Il est donc essentiel de chercher à évaluer les marges d'incertitude qui entourent ces travaux et à fournir une mesure de l'incertitude avec les estimations régionalisés des dommages.

Une deuxième leçon souligne l'importance des possibles non-linéarités régionales dans les impacts, ruptures très localisées qui peuvent être masquées par une agrégation des dommages entre zones. Par exemple, l'étude de la sensibilité de la production agricole régionalisée en réponse à une modification de l'intensité du changement climatique a mis en évidence des risques de pénuries alimentaires, en particulier induit par le changement climatique, dans de nombreuses régions. Or, ces impacts aux conséquences très importantes pour les populations qui les subissent, ont essentiellement lieu dans les régions les moins développés : ils sont donc de peu de poids au regard de la richesse mondiale et sont complètement masqués par une agrégation entre régions. Par ailleurs, la procédure d'agrégation telle qu'elle est pratiquée actuellement d'une part suppose l'existence de mécanismes de compensation crédibles entre régions et d'autre part n'envisage que la borne inférieure du montant des transferts. En effet, des ruptures très localisées au départ peuvent être largement amplifiées et transmises par des phénomènes de propagation aux économies développées, relativement épargnées par les effets directs du changement climatique.

Une troisième leçon enfin confirme les limites des évaluations des impacts disponibles à ce jour, de même que le caractère très grossier des fonction de dommages utilisées dans les modèles de recherche de politique climatique optimale. En effet, le seul déterminant climatique pris en compte dans ces évaluations est la variation de température alors que les impacts dépendent également fortement de l'évolution du régime des précipitation (*cf infra* notre exercice autour d'IMAGE) ou de la variabilité du climat. Sous les Tropiques par exemple, l'élévation de température en réponse à l'effet de serre d'origine anthropique est faible tandis que la réponse des précipitations est fortement non-linéaire : comment une fonction de dommage qui ne dépend que de la variation de la température (et de manière relativement « régulière ») peut-elle rendre compte des impacts fortement non-linéaire sur l'agriculture qui en résulte ?

II-2-b Régionalisation des dommages et incertitudes

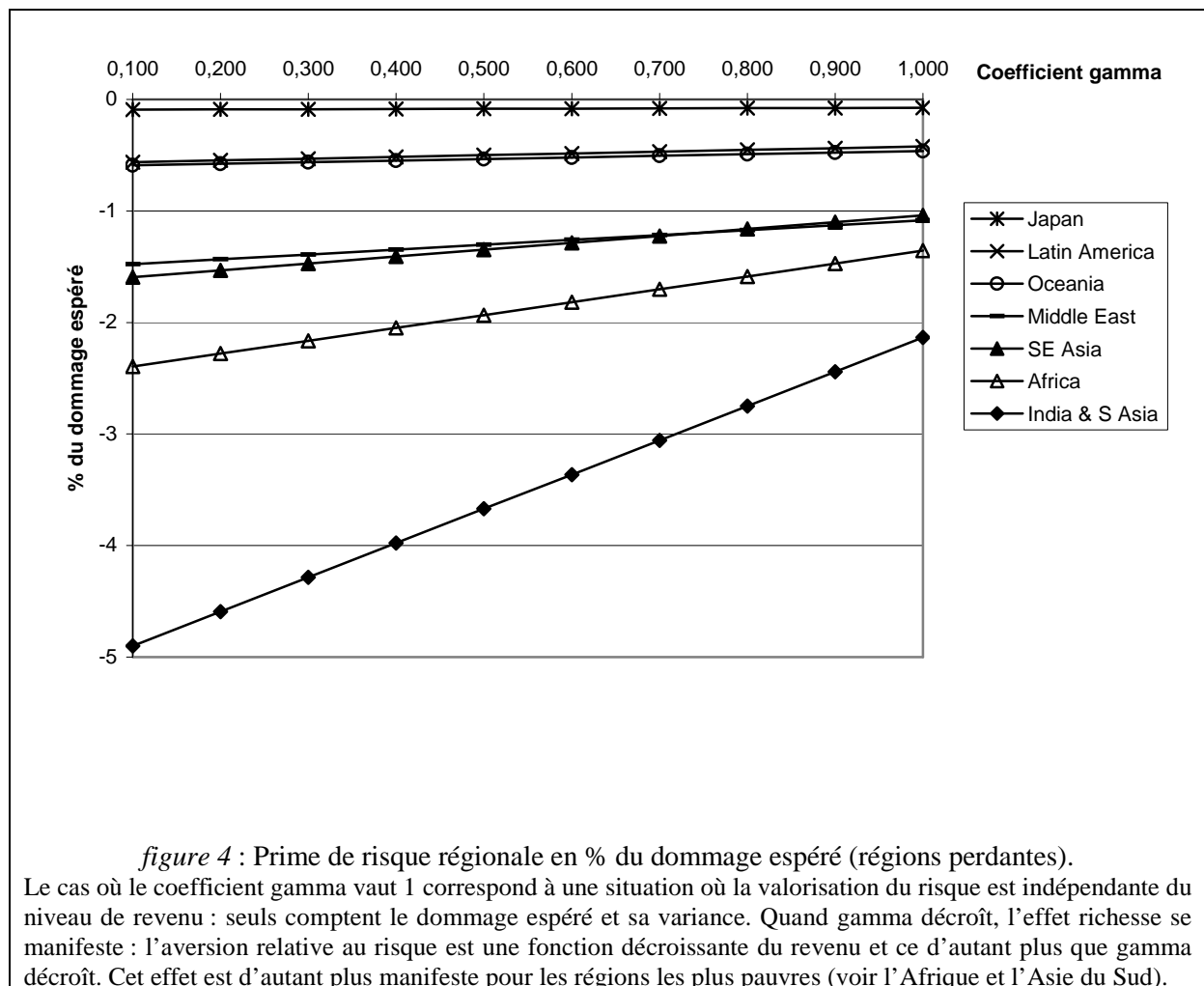
Nous nous proposons donc d'avancer sur l'évaluation régionalisés des dommages:

- en définissant un découpage du globe correspondant aux exigences croisées de l'économie et des sciences de l'univers, dont la pertinence en termes d'impacts nous semble renforcée
- en proposant une quantification de l'incertitude associée aux estimations régionalisés des dommages et à plus long-terme.

A plus long-terme notre objectif est de tester dans quelle mesure, la prise en compte de l'incertitude régionalisée sur la répartition des gains et pertes du changement climatique influence la réponse des modèles intégrés de recherche de politiques climatiques « optimales ».

L'hypothèse de base dans ce travail exploratoire consiste à considérer que les zones où la réponse des différents modèles convoqués diverge le plus sont également celles où les incertitudes sont les plus importantes. La définition de ces zones à partir d'une étude statistique de modèles climatiques reconnus (l'expérience CMIP) doit servir à établir une régionalisation simplifiée, à la fois économiquement et climatiquement cohérente.

En utilisant comme mesure de l'incertitude la variabilité de la réponse du climat (jeu sur la sensibilité), il est possible de calculer pour chacune des régions et pour différentes fonctions de dommages courantes les primes de risque associées à l'incertitude du signal. Nous avons montré que compte tenu de l'incertitude sur les estimations régionalisées des dommages, l'existence d'aversion au risque des populations exposées au changement climatique les conduit à percevoir les bénéfices retirés du changement climatique comme plus faibles et à considérer les pertes comme plus importantes. Autrement dit, en présence d'incertitude – et compte tenu de leur aversion au risque –, les populations sont plus pessimistes ; elles le sont d'autant plus que les impacts sont en espérance négatifs, que l'incertitude associée aux estimations est grande et que leur degré d'aversion au risque est élevé. C'est notablement le cas pour les populations les plus vulnérables au changement climatique, qui sont également les populations les plus pauvres, qui expriment une prime de risque élevée (figure 4).



Nous avons ainsi mis en évidence que pour des régions particulièrement vulnérables au risque climatique et peu développées, la prime de risque est assez importante. Qu'en est-il quand nous agrégeons les dommages régionaux pour calculer un dommage équivalent à l'échelle mondiale. Nous avons retenu deux règles diamétralement opposées pour notre agrégation : un poids équivalent à chaque individu (règle « Un homme, un vote ») ou des poids choisis conformément au principe « les politiques climatiques ne sont pas des politiques de redistribution du revenu » (règle « Pas de redistribution du revenu ») (figure 5).

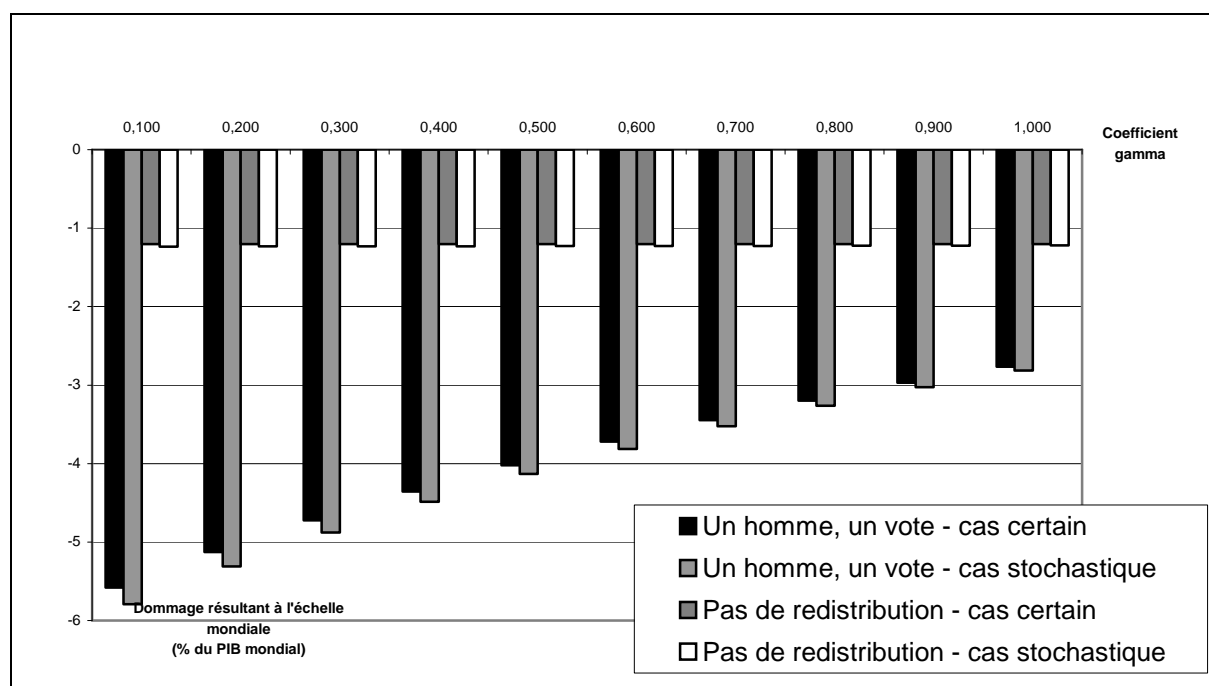


figure 5 : Agrégation des dommages régionaux

On retrouve, la prime de risque étant toujours négative dans notre cas, que le dommage équivalent à l'échelle mondiale est toujours inférieur dans le cas stochastique au dommage dans le cas certain. Quand on opère une agrégation suivant la règle "Un homme, un vote", cet écart (mesuré par rapport à la situation "cas certain") décroît de 3,81% à 1,67% (facteur 2,3) quand gamma croît de 0,1 à 1. Quand on suit la règle "Pas de redistribution du revenu", cet écart décroît de 2,62% à 1,48% (facteur 1,8). Il s'agit donc de variations très faibles et on retrouve l'effet de masque de l'agrégation.

En revanche, le choix de la pondération d'équité a une influence beaucoup plus importante sur le niveau de dommage résultant à l'échelle mondiale : les pondérations égalitaires renforçant le poids de pays peu développés (et particulièrement vulnérables). Mesurons cet effet en suivant le montant des transferts entre gagnants et perdants dans le cas certain. En effet, pratiquer une telle agrégation revient à supposer qu'il existe des mécanismes de compensation entre régions (transferts pour financer des politiques d'adaptation dans les zones très affectées, efforts de réduction des émissions supportés par les pays bénéficiaires). On peut constater que l'effet des pondérations d'équité est de majoritairement renforcer le poids des régions vulnérables en regard du poids des régions bénéficiaires. D'un côté en effet, les dommages varient presque d'un facteur 5 tandis que l'autre les gains varient d'un facteur 1,4. Le transfert consenti des gagnants vers les perdants représente selon les cas de 0,3 à 0,42% du PIB des régions bénéficiaires. A titre de comparaison, rappelons que les chiffres de l'aide internationale au développement : le montant de l'aide publique au développement des pays membres du CAD a atteint en 2000 53,7 milliards USD (valeur nominale), soit 0,22% du RNB des pays donateurs.

III Développements méthodologiques autour de la modélisation intégrée

III-1 Exercices autour du modèle IMAGE 2.1

IMAGE (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect) est un outil de modélisation intégrée du changement climatique développé au RIVM (National Institute of Public Health and the Environment, Utrecht, Pays Bas) depuis une dizaine d'années. C'est l'un des premiers modèles intégrés à représenter complètement le lien entre activité humaine et impacts, en modélisant concrètement, au delà des impacts sur le climat, les impacts sur les écosystèmes. En outre, il offre l'avantage de proposer une véritable spatialisation des impacts, sous forme de cartes.

Deux exercices autour du modèle IMAGE ont été menés : une expertise du module climatique d'IMAGE – dont les sorties ont été comparées aux données de la base CMIP - et une étude de la sensibilité de la production agricole régionalisée en réponse à une modification de l'intensité du changement climatique.

II-1-a Expertise du module climatique d'IMAGE : première mesure de l'incertitude régionalisée

Nous avons comparé les réchauffements obtenus dans des conditions semblables (milieu du siècle prochain) par la moyenne des scénarios CMIP1 ou par le scénario de référence « Haut » proposé par le groupe IMAGE, qui est ajusté sur une intégration du modèle du Max Planck Institut. La comparaison montre clairement (et ce n'est pas une surprise) à quel point la régionalisation des effets du réchauffement est dépendante du modèle considéré.

L'écart entre la réponse des modèles donne une mesure des incertitudes liée à notre connaissance encore imparfaite de la dynamique du climat : mais il y a aussi un lien fort entre difficulté à prévoir (liée à la paramétrisation des petites échelles spatiales), et instabilité du système naturel climatique lui-même (qui résulte aussi des interactions d'échelle). Nous avons cherché à évaluer la linéarité de la croissance de l'écart entre modèle, et évaluer le rapport entre réponse moyenne et dispersion des modèles.

L'écart entre les modèles est très différent pour les champs de température et de précipitation. Pour la température, nous avons un signal global de réchauffement, et la structure géographique de l'écart entre modèle est le reflet très exact de la structure géographique du réchauffement moyen. L'écart quadratique entre les réponses des modèles est de l'ordre de grandeur de la réponse moyenne et les deux quantités croissent linéairement avec le temps (dans la phase d'évolution transitoire du climat décrite par CMIP1).

Pour la précipitation, la réponse à une augmentation des gaz à effet de serre peut au contraire être soit positive soit négative, et l'on peut avoir régionalement de grandes différences entre la réponse moyenne (par exemple au centre de la France) qui peut être pratiquement nulle, alors que l'écart entre modèle est maximal (dans les zones où l'on passe rapidement, et à une latitude sur laquelle les modèles divergent, d'une réponse positive à une réponse négative). De manière générale, l'écart entre les modèles est pour la précipitation beaucoup plus grand que la réponse moyenne des modèles: cet écart évolue peu dans le temps et la difficulté des modèles à simuler un champ de précipitation cohérent domine les différences entre leur réponse à un changement climatique. Par contre le faible signal moyen des précipitations évolue linéairement avec le temps.

Par rapport aux objectifs initiaux la relative linéarité de l'évolution de l'écart entre modèle indique que la prise en compte de formes simples de représentation des aléas climatiques et de leur croissance est légitime dans des modèles économiques simples. Ces représentations simples très certainement se déclinent de manière régionale, et une première tentative a été faite pour projeter ces estimations de l'incertitude bases sur l'écart entre modèle sur les régions du modèle IMAGE: il s'agit d'une étape préliminaire qui doit être poursuivie.

II-1-b Application du modèle IMAGE 2.1 à l'évaluation de la sensibilité de la production agricole : mise en évidence de non-linéarités régionales

L'objectif de notre étude est la mise en évidence de non-linéarités dans la réponse du système complet climat-biosphère-société grâce au modèle IMAGE. Pour profiter au maximum des atouts de ce modèle, nous avons sélectionné les variables qui décrivent la végétation, qui est vue de façon beaucoup plus détaillée par IMAGE que par les modèles de circulation générale des climatologues. Comme la végétation est particulièrement sensible aux variations climatiques, elle est un bon indicateur de changement climatique et elle ajoute une couche de fortes non-linéarités. Parmi les sorties du module de végétation d'IMAGE, nous avons décidé de nous concentrer sur la production agricole, qui permet de visualiser, en plus de la sensibilité de la végétation, la vulnérabilité des sociétés. On espère ainsi ajouter à nos résultats les non-linéarités liées à l'occupation des sols et à la productivité de l'agriculture.

Pour évaluer la sensibilité de la production agricole par rapport à l'intensité du changement climatique, nous avons ajouté dans le modèle atmosphérique d'IMAGE deux coefficients de sensibilité climatique. Ce type d'étude paraît être le plus adapté aux qualités d'IMAGE, qui n'est pas assez complet pour donner une évaluation réaliste des dommages mais qui permet d'évaluer leur sensibilité à certains paramètres. Le premier coefficient modifie la sensibilité de la température, et le deuxième modifie la sensibilité des précipitations. Grâce à ces coefficients, on maîtrise en partie l'intensité du changement climatique dans nos simulations. On peut donc tester des hypothèses plus ou moins pessimistes, et parcourir la barre d'erreur des modèles climatiques. Ceci doit nous permettre d'évaluer l'importance de la propagation des incertitudes, c'est à dire de l'augmentation de l'incertitude quand on rajoute aux modèles climatiques la couche supplémentaire d'imprédictabilité qu'est l'évaluation des impacts.

Nous avons décidé de nous concentrer sur l'évolution de la sécurité alimentaire des régions d'IMAGE au cours du temps. Pour la mesurer, on procède de la façon suivante : Tous les 5 ans, on évalue la production et la demande pour chaque produit agricole. On calcule ensuite la "pénurie alimentaire par habitant" ou "shortage" en pondérant chaque produit par sa valeur calorique :

$$shortage = \frac{1}{N} \cdot \sum_i VC_i \cdot (Demande(i) - Production(i))$$

où N est le nombre d'habitants de la zone

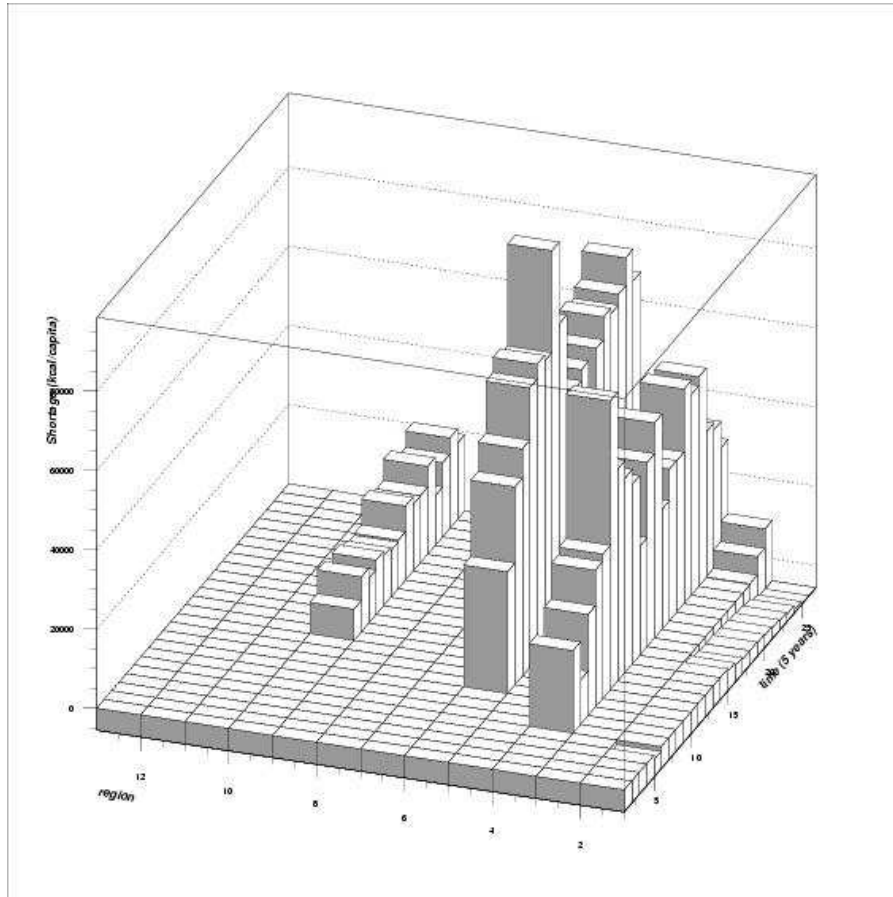
i est le numéro de l'aliment

VC_i est la valeur calorique de l'aliment i.

Une valeur de shortage positive correspond à un déficit de production, et plus elle est élevée, plus la situation est grave pour la région considérée.

♣ Simulation de contrôle

La figure 6 (ci-dessous) présente les résultats de la simulation de contrôle pour 12 zones et les 130 années de simulation. Les pays sont classés de la façon suivante : Canada (à gauche), USA, Amérique Latine, Afrique, Europe de l'Ouest, Europe de l'Est, Ex-URSS, Moyen-Orient, Inde, Chine, Asie de l'Est, Japon (à droite).



Les conclusions que l'on peut tirer de cette première simulation sont les suivantes :

- Pendant les 30 premières années, toutes les régions sont à l'équilibre demande/production, puis cet équilibre est rompu. Dans IMAGE, le changement climatique a donc un impact significatif sur la production agricole.
- Les zones tempérées ne sont pas touchées, la grande majorité des autres voient apparaître une sous-production agricole.
- Les chutes de production se font brutalement, à une date variable selon les régions et, après la phase d'augmentation brutale, la sous-production semble se stabiliser.

On observe donc des non-linéarités violentes provenant de l'occupation des sols et de la production agricole, qui montrent la nécessité de prolonger les modèles climatiques par des évaluations d'impacts et de dommages pour se faire une idée réaliste de la gravité d'un changement climatique. Il est également important de noter que les résultats obtenus sont très différents de ceux obtenus dans d'autres études, pourtant basées sur des hypothèses aussi raisonnables. Ceci confirme qu'il est irréaliste de demander à de tels modèles des prévisions déterministes.

♣ Impact du coefficient de sensibilité de la température

Quand on augmente la sensibilité de la température, la sous-production simulée par le modèle augmente linéairement, mais la date à laquelle elle apparaît reste inchangée. Le coefficient de la température ne change donc pas qualitativement les effets du changement climatique sur l'agriculture, mais semble avoir une influence importante sur le niveau de sous-production.

♣ Impact du coefficient de sensibilité des précipitations

Parmi les simulations destinées à tester la sensibilité de la production au coefficient de sensibilité des précipitations, seules celles pour des sensibilités faibles ont pu être menées à leur terme. On a donc beaucoup de mal à maîtriser le comportement du modèle et à modifier la sensibilité de ses paramètres.

Nos résultats montrent que quand la sensibilité des précipitations augmente, la sous-production simulée augmente très fortement et qu'elle arrive nettement plus tôt et plus brutalement.

Notre coefficient de sensibilité est imparfait, mais il montre néanmoins une forte sensibilité de la production agricole aux variations de précipitations, qui représentent la réelle menace pour l'agriculture.

L'utilisation du modèle IMAGE et l'étude de ses prévisions de la production agricole nous a permis de mettre en évidence la possibilité de conséquences graves du changement climatique sur l'autosuffisance alimentaire de certaines régions du monde. Il semble également que ces conséquences peuvent apparaître de façon brutale à cause des non-linéarités du système complet climat-biosphère-société. Ceci montre la nécessité d'une modélisation précise des impacts et des dommages pour tirer des conclusions sur la gravité du changement climatique.

De plus, nous avons confirmé que si la production agricole est sensible aux modifications de température, c'est les variations de précipitations qui ont les conséquences les plus dangereuses. Ceci met en avant la nécessité de faire progresser notre compréhension du cycle hydrologique et nos prévisions des distributions de précipitations dans un climat modifié.

Les résultats obtenus montrent également que l'augmentation moyenne de température n'est pas un paramètre suffisant pour modéliser le changement climatique et qu'il est temps d'inclure dans les modèles d'impact d'autres variables (précipitations par exemple) et les incertitudes sur chacune des variables utilisées.

Le modèle IMAGE a montré des qualités et des défauts contrastés:

- la structure générale du modèle en fait un exemple fort pour le développement d'une nouvelle génération de modèles intégrés plus complexes. Il est en particulier très tentant de remplacer le module climatique très simple d'IMAGE par un module climatique plus complexe (en cours au RIVM, et chez JF Royer à Météo-France). Les modèles actuels du "système Terre" tel que celui qui est développé à l'IPSL sont aussi des modèles couplant climat, cycle du carbone, chimie atmosphérique, biogéochimie océanique: on imagine qu'il y aura une convergence future (avec une hiérarchie de modèles de complexités variées) entre les approches issues des sciences dures, et des approches de type RIVM, et une structure flexible et modulaire des codes informatiques devrait faciliter cette évolution.
- en l'état le module climatique du modèle IMAGE est beaucoup trop fruste pour en faire le vecteur d'études régionales qui aient un sens très poussé en terme d'impact.
- mais le modèle peut-être utilisée pour l'étude de non-linéarités telles que celles qui peuvent résulter des interactions entre production agricole et climat.

III-2 Test d'une technique de couplage entre modèles

Le but de ce travail est:

- d'utiliser un formalisme permettant une étude détaillée des couplages et rétroactions entre diverses variables dans la modélisation de systèmes complexes,
- afin de développer des modèles intégrés simplifiés (par rapport aux modèles existants du type IMAGE) pour étudier les couplages entre processus climatiques et réponses économiques.

Dans cette perspective, les étapes suivantes ont été :

- la mise en œuvre dans ZOOM d'un modèle économique couplé à un modèle énergétique et validation par comparaison aux versions déjà existantes (modèles IMACLIM-PROJ et NEXUS, développés par le CIREC)
- et la définition d'un exercice simplifié exhibant la problématique mathématique des couplages, rétroaction, propagation des incertitudes.

Le modèle reprogrammé a permis de retrouver les résultats obtenus précédemment mais tandis que les modèles utilisés au CIREC donnent les résultats seulement pour l'année d'éprojection visée, la nouvelle version du modèle, reprogrammée sous TEF-ZOOM, donne les valeurs pour chaque pas de temps de toutes les variables utilisées (quantités, prix, etc...) et permet d'étudier de façon simple et rapide la dépendance des résultats à une variation de chacune des hypothèses prise séparément.

Bien plus, le calcul des coefficients de rétroaction, qui se fait automatiquement dans le logiciel, complète les possibilités de caractérisation de la dynamique du système. Nous avons choisi ici d'étudier la rétroaction du système sur l'indice du prix des transports. Le prix du transport fourni par l'équation d'équilibre agit sur l'ensemble du système qui à son tour, modifie l'équilibre du prix du transport : c'est ce qu'on appelle une boucle de rétroaction. La courbe représentée figure 7 présente les valeurs (de l'opposée) du gain de rétroaction : il reste positif sur la durée de la simulation (30 ans) et garde une valeur à peu près constante, environ 15% sur chaque intervalle de temps (1an).

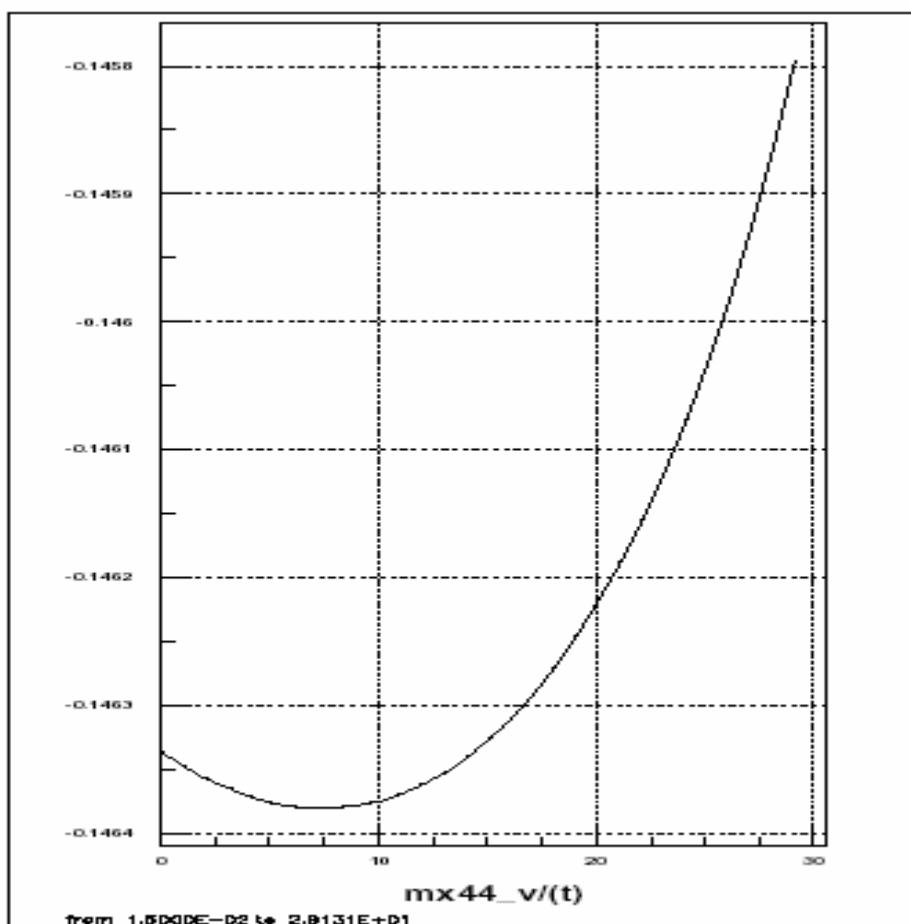


figure 7 : Gain de rétroaction sur le prix des transports sur la durée de la simulation (30 ans).

Grâce à ce travail préliminaire, nous sommes en mesure d'aborder la problématique de définition « d'outils intégrés » destinés à accompagner le questionnement pluri-disciplinaire lié aux effets climatiques de l'activité anthropique. En effet, une particularité qui se révélerait très intéressante dans le cadre du développement de modèles intégrés est que le logiciel ZOOM est conçu de façon à faciliter les études de sensibilité ainsi que les études de couplages et de rétroaction entre différentes variables provenant de modules différents.

Une perspective pourrait donc être la construction d'un modèle intégré économie/climat avec une représentation de l'incertitude sous forme probabiliste, modèles dont les premières briques sont posées dans le cadre du programme « Renforcement des capacités de scénarisation à long-terme : maîtrise des données-couplage de modèles » (APR GICC 2001- th. 4 « Mesures d'accompagnement », CEPII/CIREN/IEPE/LMD).

E. CONCLUSION

Ce programme de recherche, initialement à vocation méthodologique autour des pratiques et des architectures de la modélisation intégrée de l'effet de serre, a néanmoins permis de faire apparaître un certain nombre de résultats, qui, s'ils doivent encore être validés, sont toutefois assez robustes et méritent d'être rappelés :

l'importance de la prise en compte des rétroactions entre émissions de CO₂, changement d'affectation des terres et cycle du carbone puisque cette prise en compte conduit à augmenter de 20 à 80 ppm en 2100 les concentrations issues des scénarios SRES, ce qui accroît d'autant l'effort d'abattement à effectuer pour respecter un niveau de concentration et renforce la nécessité de freiner la déforestation et de renforcer la séquestration dans la biomasse.

l'importance de la prise en compte de l'incertitude sur la sensibilité du climat puisque les valeurs que nous avons testées (2,5°C-3,5°C-4,5°C) impliquent de viser des cibles de stabilisation à long-terme de la concentration atmosphérique de CO₂ inférieures dans tous les cas au trio 450ppm-550ppm-650ppm, cibles couramment étudiées dans la littérature. Ainsi, pour respecter une contrainte sur l'amplitude du réchauffement comme +2°C, il se pourrait qu'il faille stabiliser la concentration atmosphérique de CO₂ à une valeur inférieure à 450ppm, plafond très strict qu'il sera presque impossible d'envisager de respecter dans quelques décennies si les tendances actuelles des émissions se poursuivent.

en présence d'incertitude sur la sensibilité du climat, nous avons montré que le taux d'actualisation n'est plus un paramètre socio-économique dominant comme il l'est en cas certain, voire il joue un rôle moins important que l'inertie socio-économique quand le temps de renouvellement du capital émetteur est élevé. Nos résultats mettent en fait en évidence la prégnance de l'effet d'irréversibilité environnementale qui domine très largement le rôle du taux d'actualisation et du degré d'inertie socio-économique, déterminants principaux pour un jeu donné de contraintes environnementales du timing des efforts.

l'introduction de seuils, et l'incertitude sur les seuils dans les cas défavorables, est critique pour la décision, tandis que des non-linéarités de type puissance ne changent pas le timing de l'action. La perspective d'une perte de consommation relativement faible (4%), mais suffisamment proche et concentrée dans le temps, peut justifier des efforts de réduction sensibles à court terme.

il existe un certain nombre de biais d'agrégation des évaluations régionalisées des dommages du changement climatique qui peuvent en l'occurrence conduire à des recommandations trompeuses, en sous estimant notamment les dangers de phénomènes de propagation qui font de l'affaire climatique une nouvelle dimension de la sécurité internationale.

Sur le plan méthodologique, il ressort que nous avons pu :

améliorer la représentation des phénomènes naturels dans les modèles intégrés de recherche de politique climatique optimale (cycle du Carbone, modèle d'évolution de la température)

élaborer une culture commune entre équipes d'horizons disciplinaires différents pour permettre à notre communauté scientifique d'améliorer sa capacité de travail interdisciplinaire

préciser les éléments constitutifs d'outils intégrés maîtrisables scientifiquement (et numériquement) tant par les climatologues que les économistes,

rassembler les équipes françaises dans la perspective de la constitution actuelle des réseaux d'excellence de modélisation intégrée européens.

F. VALORISATIONS

Publications dans des revues à comité de lecture

GITZ, V., et Ph. CIAIS "Amplifying effects of land use change on future atmospheric CO₂ levels", *Global Biogeochemical Cycles*, in press

AMBROSI, P., et J.-C. HOURCADE (2002). « Evaluer les risques climatiques : ambiguïté de l'information et effets de croyance », *Risques*, n°50, pp. 61-73.

LECOCQ, F., et J.-C. HOURCADE (2002). « Le taux d'actualisation contre le Principe de Précaution : leçons à partir du cas des politiques climatiques », soumis à *Actualité économique*.

AMBROSI, P., HOURCADE, J.-C., HALLEGATTE, S., LECOCQ, F., DUMAS, P., et M. HA-DUONG (2002). "Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages", soumis à *Environmental Modelling and Assessment*.

Contributions à des colloques

DUMAS, P., et M. HA-DUONG (2001). « Non-linearities and uncertain climate impacts », Energy Modelling Forum (EMF) : Laxenburg (Austria), 19-21 juin 2001.

DUMAS, P., et M. HA-DUONG (2001). « Non-linearities and uncertain climate impacts », IGBP-IHDP-WCRP : Amsterdam (The Netherlands), 10-13 juillet 2001.

GRANDPEIX, J.-Y. (2001). « Pertinence de la notion de gain de rétroaction : présentation des résultats obtenus dans le cadre du programme GICC », 5-èmes Rencontres annuelles sur le Formalisme d'Evolution par Transfert et le logiciel ZOOM : Tarbes (France), 16-18 Juillet 2001.

GITZ, V. (2002). « Optimal timing of CO₂ abatement: improving Carbon-cycle, Land Use and climate representations in compact IAMS », Workshop NCCR-Climate WP4 : Geneva (Switzerland), 21 nov. 2002.

Participation à des séminaires de recherche - enseignement

Cours de DEA « Couplage en mécanique des fluides et énergétique », donnés par J.Y. GRANDPEIX dans le cadre du DEA "Énergétique et transferts" de l'Université Paul Sabatier (Toulouse, Février 2002).

HOURCADE, J.-C. (2002). « Variations autour du principe de précaution vis à vis des risques climatiques ». Séminaire de R. Guesnerie « Enjeux économiques de l'effet de serre », Collège de France, mars 2002.

HOURCADE, J.-C. (2002). « Taux d'actualisation, incertitude sur les dommages et rythme de décarbonisation de l'économie ». Présentation au Groupe de travail du CAE sur l'effet de serre, présidé par R. Guesnerie, janvier 2002.

Thèses et mémoires

DUMAS, P. (2000). « Catastrophe hypothétique et politique climatique », mémoire de DEA. DEA EERN EHESS-INAPG-ENGREF-UPX.

Un certain nombre de travaux menés à l'occasion de ce programme de recherche seront repris par leurs auteurs dans les thèses de MM. Ambrosi, Dumas, Gitz et Hallegatte.

HALLEGATTE, S., AMBROSI, P., et J.-C. HOURCADE (2002). « Climate and physical information needed for economic and policy analysis”, D6-A1 Report of Working Group 6 to PRUDENCE Consortium, Contract No. EVK2-2001-00156, oct. 2002.

G. DONNEES

Les données utilisées dans le cadre de notre programme proviennent de trois sources principales :

Pour les données socio-économiques (évolution de la population, croissance du PIB, volume des émissions par secteur, modification de l'usage des sols), nous avons utilisé les données en provenance des scénarios SRES, soit directement accessibles à partir du Data Distribution Centre de l'IPCC (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>), soit à partir du CD-rom d'intégration des SRES par le modèle IMAGE 2.2 (« The IMAGE 2.2 implementation of the SRES scenarios », RIVM, Bilthoven, The Netherlands, eml : image-info@rivm.nl, <http://www.rivm.nl/ieweb/>).

Pour les données sur le cycle du Carbone et les résultats des GCM, nous avons utilisé les données disponibles sur le site du Carbon Dioxide Information Analysis Centre (CDIAC, <http://cdiac.esd.ornl.gov/>) et les résultats de l'expérience CMIP1, accessibles après acceptation d'un projet d'analyse des simulations par le panel CMIP, qui gère la distribution de ces données.

Enfin, pour les calibrations et les validations des modèles que nous avons développés, nous avons entre autres utilisé des simulations produites par le modèle de végétation terrestre CASA-SLAVE (P. Friedlingstein, CEA) et par le modèle de l'IPSL (P. Friedlingstein, CEA).

Dans la mesure où ces données sont issues d'une part de bases de données déjà structurées (en accès libre ou restreint) et d'autre part de bases de données spécifiques aux modèles utilisés, dans la mesure également où ce programme de recherche était majoritairement à vocation méthodologique (amélioration de modèles, couplages de modèles), il n'est pas demandé à ce stade de constitution de base de données unifiée pour présenter nos résultats.