

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE III - PAUL SABATIER

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITE TOULOUSE III

Discipline : Physique de l'atmosphère

Présentée et soutenue

par

Aurore VOLDOIRE

le 31 mars 2005

**Prise en compte des changements de végétation
dans un scénario climatique du XXI^{ème} siècle**

Directeur de thèse : Paul PETTRE

JURY

M.	Robert DELMAS	Président
Mme	Pascale BRACONNOT	Rapporteur
M.	Jan POLCHER	Rapporteur
M.	Martin BENISTON	Examinateur
Mme	Christine DELIRE	Examinateur
M.	Paul PETTRE	Directeur de thèse
M.	Jean-François ROYER	Invité

Remerciements

Ce manuscrit est l'image qu'il restera de mes trois premières années passées au CNRM. Pour que cette image soit la plus fidèle possible, il ne faut pas oublier de planter le décor de cette thèse. De nombreuses personnes ont participé de près ou de loin à ce travail ; elles méritent d'être citées et remerciées.

Je remercie ainsi Jean-François Royer qui est à l'origine de ce travail. Merci de m'avoir accueillie à GMGEC/UDC. Tu as toujours su m'inciter à poursuivre ce travail tout en me laissant une grande liberté. Merci aussi à Hervé Douville, qui est resté un peu dans l'ombre de cette thèse et à qui elle doit pourtant beaucoup. Merci pour tous les conseils que tu m'as prodigués, merci d'avoir toujours eu du temps à me consacrer. Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Karine Maynard qui m'a mis le pied à l'étrier ; nous n'avons pas seulement partagé un bureau, nous avons aussi partagé mes débuts dans la recherche et tu as toujours su m'encourager dans les premiers pas parfois pénibles de cette thèse. Merci aussi à Anne-Laure Gibelin, nous nous sommes souvent réconfortées devant nos doutes respectifs, et nos longues discussions nous ont permis d'avancer pas à pas. Merci à Fabrice Chauvin pour ta bonne humeur, ton écoute et tes conseils. Merci aussi à David Salas, j'apprécie tout autant tes qualités scientifiques que tes talents de pâtissier... Mais le cocon UDC doit aussi beaucoup à Sophie Tyteca, qui est toujours là pour nous soutenir, surtout face à nos redoutables machines pas toujours très coopératives. Merci pour ta patience et ta gentillesse face à mes requêtes parfois agacées... Je remercie aussi Michel Tyteca et de toute l'équipe CTI pour leur servabilité en toutes circonstances. L'ambiance de travail à GMGEC doit également beaucoup à l'incontournable pause-café du matin. Merci à tous les adeptes du café qui ont participé à égayer les réveils difficiles.

Un grand merci à Michiel Shaeffer et Bas Heickout, ils m'ont initié aux arcanes du modèle IMAGE2.2 puis m'ont laissé l'utiliser à ma guise. J'ai beaucoup apprécié la convivialité qui s'est installée dans nos échanges. À travers eux, je remercie toute l'équipe IMAGE du RIVM pour m'avoir confié leur modèle. Merci également à Pascale Braconnot et Jan Polcher pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Leur point de vue extérieur a été très enrichissant. Merci aussi à Robert Delmas, Christine Delire et Martin Beniston pour avoir été membres du jury de la thèse.

Enfin, au-delà de ceux qui ont contribué à ce travail, je voudrais remercier toutes les personnes de mon entourage qui m'ont soutenue durant ces presque 4 années.

Table des matières

Introduction	7
1 Modèles d'impacts intégrés et IMAGE2.2	11
1.1 Les modèles d'impacts intégrés	11
1.1.1 Dans quel but ?	11
1.1.2 Des approches très variées	12
1.1.3 Tendance actuelle	14
1.1.4 Les scénarios produits	17
1.2 IMAGE2.2	18
1.2.1 Module Energie-Industrie (EIS)	18
1.2.2 Module d'environnement (TES : Terrestrial Environmental System)	21
1.2.3 Calcul des concentrations	24
1.2.4 Module climatique	26
2 Introduction d'un forçage climatique plus réaliste dans IMAGE2.2	29
2.1 Modélisation du climat dans IMAGE2.2	29
2.1.1 Méthode de régionalisation	29
2.1.2 Indices climatiques utilisés	32
2.2 Expériences de sensibilité réalisées	35
2.2.1 Principe	35
2.2.2 Changement du motif	37
2.2.3 Changement de la sensibilité	43

2.2.4	Utilisation directe d'un scénario de AOG	46
2.2.5	Utilisation des TSMs de AOG	50
2.2.6	Modification de la nébulosité	51
2.3	Sensibilité d'IMAGE au forçage climatique	52
2.3.1	Évolution de la couverture de végétation	53
2.3.2	Évolution des émissions	58
2.4	Synthèse	60
3	Changement de végétation réaliste dans ARPEGE-Climat	63
3.1	Historique de la modélisation des interactions végétation-climat	63
3.1.1	Études pionnières	63
3.1.2	Études relatives à l'impact de la végétation	66
3.1.3	Développements actuels	69
3.2	ISBA et spécification de ses paramètres de la végétation	70
3.2.1	ISBA	70
3.2.2	Attribution des paramètres de la végétation	72
3.3	Changement de végétation réaliste	74
3.3.1	Description des expériences réalisées	74
3.3.2	Comparaison des impacts du changement de végétation et du changement de concentration en GHGs	80
3.3.3	Impacts régionaux des changements de végétation	84
3.3.4	Synthèse	95
4	Expériences de déforestation tropicale massive dans AOG	97
4.1	Introduction	97
4.1.1	Motivation de l'étude	97
4.1.2	Description des simulations réalisées	98
4.2	Simulations avec le modèle atmosphérique seul	99
4.2.1	Impacts locaux sur le climat moyen	99
4.2.2	Impacts sur la variabilité journalière	100

4.2.3	Impacts sur la variabilité inter-annuelle	100
4.3	Simulations avec le modèle couplé océan-atmosphère	101
4.3.1	Impacts locaux	101
4.3.2	Impacts non locaux	102
4.4	Conclusion	102
5	Scénario climatique du XXI^{ème} siècle avec AOG couplé à IMAGE2.2	105
5.1	Description du couplage	105
5.1.1	Modification de la carte de végétation	106
5.1.2	Modification de la charge des aérosols sulfatés	108
5.1.3	Caractéristiques de la simulation réalisée	108
5.2	Simulation du climat dans AOG	109
5.2.1	Forçages calculés par IMAGE	109
5.2.2	Climat simulé	113
5.3	Caractéristiques de la simulation IMAGE	121
5.3.1	Évolution de la végétation	121
5.3.2	Évolution des émissions	128
5.4	Conclusion	128
Conclusion		131
Liste des tableaux		139
Liste des figures		141
Bibliographie		147
Annexes		151
A Bilan hydrique et calcul des indices climatiques		153
A.1	Bilan hydrique	153
A.1.1	Calcul de l'évaporation potentielle	154

A.1.2 Calcul de l'évaporation réelle	155
A.2 Indices climatiques	155
B Calcul des productivités potentielles agricoles	157
C Régions IMAGE	161
D Paramètres de la végétation	163
E Tropical Deforestation and climate variability	167
Article publié dans Climate Dynamics, Juillet 2004	167
F Climate sensitivity to tropical land surface changes with coupled versus prescribed SSTs	169
Article publié dans Climate Dynamics, Juin 2005	169

Introduction

L'homme modifie les écosystèmes depuis qu'il a abandonné le nomadisme et qu'il a commencé à pratiquer l'élevage. L'influence de l'homme sur son environnement est toutefois restée limitée jusqu'au XVIII^{ème} siècle. Depuis, la modification des écosystèmes par l'homme s'est largement accrue. S'il est maintenant difficile de trouver un écosystème qui soit vierge de toute influence humaine, ? (?) estiment que 40% à 50% de la surface terrestre a été transformée ou est exploitée par l'homme. L'homme a principalement étendu les surfaces cultivées aux dépens de la forêt et des prairies. On estime (?) qu'en 1700, la surface des cultures était équivalente à celle de l'Argentine et qu'elle atteint maintenant la surface de tout le continent sud-américain.

Aux moyennes latitudes, l'extension des terres cultivées s'est un peu ralentie à la fin du XX^{ème} siècle. La surproduction et l'exode rural ont même conduit à l'abandon de certaines terres. Aux tropiques, la pression démographique explose et pousse les populations à étendre les cultures aux dépens de la savane mais aussi des forêts. Les forêts tropicales sont ainsi de plus en plus exploitées pour la production du bois. Cette déforestation est un phénomène récent qui s'accélère considérablement depuis quelques décennies. L'homme a aussi un effet indirect sur les écosystèmes : le changement de climat induit par les gaz à effet de serre d'origine anthropique pourrait modifier notablement les zones de développement des espèces naturelles et cultivées, étant acquis que la répartition de la végétation continentale est fonction du climat.

Ces changements de végétation modifient les propriétés biophysiques des surfaces continentales qui contrôlent les flux à l'interface entre le sol et l'atmosphère. ? (?) a été l'un des premiers à postuler que les changements de végétation pouvaient avoir un impact sur le climat. Il a ainsi montré que la désertification sur le Sahel diminue l'albédo de la surface et modifie ainsi le bilan radiatif continental et la circulation de grande échelle. La végétation ne contrôle pas seulement le bilan radiatif en surface, mais aussi les flux de chaleur et de vapeur d'eau. Elle intercepte les précipitations et est capable de puiser de l'eau dans le sol profond. Toute modification de la végétation influe donc sur les différents flux en surface et peut ainsi avoir un impact sur le climat.

Le système climat-végétation est ainsi un système complexe, en équilibre. ? (?) ont montré que l'augmentation de température des hautes latitudes survenue à l'Holocène (6500 ans) a permis aux forêts boréales de s'étendre plus vers le nord à la place de la toundra. Cela a diminué l'albédo des hautes latitudes et amplifié le réchauffement initié par une modification de l'orbite terrestre. Cette étude montre ainsi que la végétation peut participer à des rétroactions importantes sur l'évolution du climat.

Un autre aspect de l'interaction entre le climat et la végétation concerne le bilan de carbone. Par la photosynthèse, la végétation absorbe du dioxyde de carbone atmosphérique dont elle fixe le carbone pour produire de la biomasse, tandis que par la respiration, elle吸du dioxygène pour rejeter du dioxyde de carbone. Au bilan, la végétation, au cours de sa vie, fixe plus de carbone qu'elle n'en rejette puisque le carbone est son principal constituant. Toutefois, lorsque le végétal meurt, la biomasse est progressivement dégradée et peut retourner dans l'atmosphère. On sait par ailleurs que l'activité photosynthétique dépend de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Pour étudier l'impact climatique des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, la végétation est donc une composante essentielle pour bien représenter le cycle du carbone et son évolution.

Dans le cadre de la réalisation de simulations climatiques du XXI^{ème} siècle, dites simulations scénarios, on comprend bien que la dynamique de la biosphère et son interaction avec l'atmosphère sont à prendre en compte. Pour évaluer le climat futur, chaque type de modification de l'homme sur l'environnement (gaz à effet de serre, aérosols, végétation) peut être simulé et analysé séparément. Cependant, prendre en compte l'ensemble des phénomènes dans un seul système présente l'intérêt de permettre d'identifier les éventuelles interactions non-linéaires qui pourraient se mettre en place. Jusqu'à présent, les simulations climatiques effectuées au CNRM et dans la plupart des centres de modélisation impliqués dans la production de scénarios du XXI^{ème} siècle, prenaient en compte uniquement les changements de concentration des gaz à effet de serre et des aérosols. La distribution de la végétation continentale était, en général, définie par rapport à des observations sur la période récente et n'était pas modifiée au cours de la simulation.

Cette thèse a pour principal objectif d'intégrer la modélisation des changements de végétation, et en particulier de l'utilisation des sols, dans une simulation climatique du XXI^{ème} siècle. Pour simuler l'évolution future de la végétation, il faut non seulement prendre en compte l'impact du climat sur les végétaux mais aussi la pression anthropique sur l'utilisation des terres. Ainsi, le système que l'on veut mettre en place n'est pas uniquement régi par des lois physiques mais aussi par des processus économiques. Allier les contraintes économiques et physiques en une seule entité a déjà été réalisé dans des modèles dits d'impacts intégrés. Parmi ceux-ci, le modèle IMAGE développé au RIVM (National Institute of Public Health and the Environment, Pays Bas) simule l'évolution de la couverture végétale au cours du XXI^{ème} siècle. La thèse a ainsi consisté à coupler un mo-

dèle de circulation générale océan-atmosphère-glace (ARPEGE-Climat/OPA/GELATO) à ce modèle d'impacts intégré, afin de pouvoir représenter de façon dynamique l'évolution de la végétation dans le modèle de climat.

Quand cette thèse a débuté, le modèle atmosphérique ARPEGE-Climat comprenait un modèle de surface, ISBA, qui simule les échanges d'eau, d'énergie et de quantité de mouvement entre les continents (système sol-végétation-neige) et l'atmosphère. Les flux de carbone ne sont pas modélisés dans la version du schéma disponible au sein du modèle ARPEGE-Climat. Dans cette thèse, nous nous intéressons ainsi principalement à l'impact des modifications de la végétation sur les échanges d'eau, d'énergie et de quantité de mouvement. L'aspect cycle du carbone n'est pourtant pas complètement négligé. Le modèle d'impacts intégré représente de façon explicite la photosynthèse et le cycle du carbone. Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone fournies par ce modèle intègrent ainsi l'impact des changements de végétation.

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à la description des modèles d'impacts intégrés en général : leur but, les concepts sur lesquels ils sont basés, ainsi que les différents types de modèles existants. Une description plus spécifique du modèle IMAGE2.2 utilisé dans ce travail est présentée. Cette étape permet de préciser sur quelles hypothèses repose un tel modèle et donc ses limites.

Le deuxième chapitre présente une étude de sensibilité du modèle d'impacts intégré IMAGE2.2 au changement de forçage climatique. IMAGE2.2 contient normalement un module climatique simple qui évalue le changement de climat induit par l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre. Afin de préparer le couplage final entre le modèle ARPEGE-Climat/OPA/GELATO et IMAGE2.2, différentes méthodes d'introduction du changement climatique tel que simulé par notre modèle climatique sont étudiées. En particulier, on analyse l'impact du changement de la sensibilité de la température à la concentration en gaz à effet de serre.

Le troisième chapitre présente tout d'abord un historique de l'étude des interactions entre la végétation et le climat, ainsi qu'une description brève du modèle de surface ISBA. Ensuite, une étude de sensibilité du modèle de climat à différents forçages en surface est exposée. Cette étape est symétrique à celle présentée au chapitre précédent, puisqu'elle permet d'établir la sensibilité du modèle de climat aux cartes de végétation produites par IMAGE. Des simulations atmosphériques avec des forçages constants sont réalisées. Deux paires d'expériences sont analysées : la première paire utilise une carte de végétation simulée par IMAGE2.2 pour la période actuelle, la deuxième une carte simulée pour le milieu du XXI^{ème} siècle. Chaque paire est composée d'une expérience utilisant des forçages en gaz à effet de serre, aérosols et température de surface de la mer (TSM) pour la période actuelle et d'une autre utilisant des forçages pour le milieu du XXI^{ème} siècle.

Cette série d'expériences permet de déterminer la sensibilité du modèle atmosphérique à des changements de végétation réalistes. Elle permet aussi d'évaluer si les effets des changements de concentration en gaz à effet de serre et des changements de végétation sont additifs ainsi que leur amplitude relative.

Dans le quatrième chapitre, des simulations plus académiques de déforestation tropicale massive sont étudiées. Cette étude a été élaborée dans un double but. D'une part, caractériser la sensibilité du système ARPEGE/ISBA par rapport à d'autres modèles surface-atmosphère équivalents. Ce genre d'étude ayant été réalisé avec beaucoup de modèles, elle permet une comparaison instructive. D'autre part, cette étude a été répétée avec le modèle couplé océan-atmosphère ARPEGE/OPA afin d'analyser l'importance de l'inclusion du modèle d'océan dans des expériences de sensibilité à la couverture végétale. Les travaux présentés succinctement dans ce chapitre ont fait l'objet de deux publications jointes en annexe E et F.

Enfin, le dernier chapitre présente le système couplé ARPEGE/OPA/GELATO-IMAGE finalement mis en place. Une simulation scénario du XXI^{ème} siècle avec le système complet est présentée. Cette simulation constitue plutôt une validation technique du système mis en place. Une analyse détaillée des rétroactions entre AOG et IMAGE demanderait de réaliser des ensembles de simulations globales particulièrement coûteux et hors de portée dans le cadre de cette thèse. Le scénario réalisé permet toutefois de déterminer si le nouveau système simule des rétroactions importantes entre la végétation et le climat au cours du siècle. Pour plus de lisibilité et une meilleure compréhension, dans la suite du texte, le modèle de circulation générale couplé océan-atmosphère-glace de mer-chimie composé de ARPEGE-Climat, OPA, GELATO et MOBIDIC sera nommé AOG.

Chapitre 1

Modèles d'impacts intégrés et IMAGE2.2

1.1 Les modèles d'impacts intégrés

1.1.1 Dans quel but ?

L'objectif d'un modèle d'impacts intégré appliqué au changement climatique est de combiner des composantes issues de disciplines diverses afin de mieux représenter et analyser les impacts de l'activité humaine sur notre environnement. Ce type de modèle permet ainsi de fournir une vue d'ensemble de la problématique du changement climatique. Pour cela, il est nécessaire, non seulement de modéliser les principales composantes du système terrestre (économie, société, écosystèmes, climat, ...), mais aussi et surtout de modéliser les interactions et les rétroactions entre ces différentes composantes. La principale originalité d'un tel modèle est donc de caractériser les interactions entre différents modules issus de disciplines variées.

Le but initial de l'évaluation intégrée était principalement d'aider les décideurs à mieux appréhender la question du changement climatique en leur apportant une vision globale et cohérente du problème. Cela a encouragé les discussions entre chercheurs d'horizons différents, tout en aboutissant à une formalisation de ce travail au travers de modèles. Ces modèles permettent par exemple de comparer l'impact de différentes mesures politiques et économiques qui pourraient être prises. Leur fonction principale n'est pas de faire avancer la recherche mais plutôt de constituer un outil d'aide aux décideurs. Ces modèles permettent aussi de mettre en évidence les principales sources d'incertitudes et ainsi de souligner les domaines où les efforts doivent se porter pour réduire ces incertitudes.

Ces modèles sont fondés sur un concept séduisant, mais ils souffrent de limites inhérentes à leur construction. D'une part, dans chacune des disciplines concernées, les modules utilisés sont des versions simplifiées de l'état de l'art. En effet, regrouper les modèles les plus élaborés de chacun des domaines aboutirait à un outil beaucoup trop lourd à utiliser. La complexité des systèmes sociaux et naturels ne peut donc être totalement représentée. D'autre part, ces modèles reposent sur de nombreuses hypothèses et paramètres qu'il faut spécifier et dont la qualité limite l'applicabilité. Ces modèles doivent ainsi être utilisés avec précaution en n'oubliant pas leurs hypothèses fondatrices lors de l'analyse des résultats. Par ailleurs, ils reposent en partie sur des relations établies sur la période actuelle et qui pourraient se révéler erronées dans le futur. C'est une des principales limites des modèles économiques, en particulier pour des projections à longue échéance (à plus de quelques décennies). Les modèles paramétrisant des phénomènes physiques sont eux aussi soumis à ce problème. Toute relation empirique élaborée à partir de données obtenues sur une période courte peut perdre son sens sous un climat différent. Même si des efforts sont faits pour anticiper ces limitations, les concepteurs des modèles ont forcément une appréciation biaisée par le monde qui les entoure.

1.1.2 Des approches très variées

Il existe quelques dizaines de modèles d'impacts intégrés, qui ont été élaborés avec des objectifs divers. Le tableau 1.1 donne une liste non exhaustive de ces modèles ainsi que les références bibliographiques qui leur sont associées. Le niveau de détail pris en compte varie fortement d'un modèle à l'autre et leur seul point commun est de regrouper des connaissances de plusieurs disciplines. Toutefois, la plupart des modèles d'impacts intégrés regroupent les quatre domaines suivants :

- ▶ activités humaines
- ▶ composition chimique de l'atmosphère
- ▶ climat et niveau de la mer
- ▶ écosystèmes

Le graphique 1.1 schématisse ces différents aspects et leurs interactions. Suivant les modèles, ces domaines sont modélisés avec plus ou moins de détail et les échelles prises en compte sont aussi très diverses. Ainsi, certains modèles sont basés sur des modèles macro-économiques sans découpage régional (DICE) tandis que d'autres différencient plus d'une dizaine de régions (FUND, IMAGE2.2). Weyant *et al.* (1996) distinguent deux grands types de modèles intégrés : les modèles d'**évaluation** et les modèles d'**optimisation**.

Le premier type de système vise à modéliser l'évolution du système «Terre» suivant des hypothèses sur l'évolution économique, technologique et démographique fixées au départ (IMAGE2.2, AIM). On évalue donc les conséquences d'un certain mode de vie à

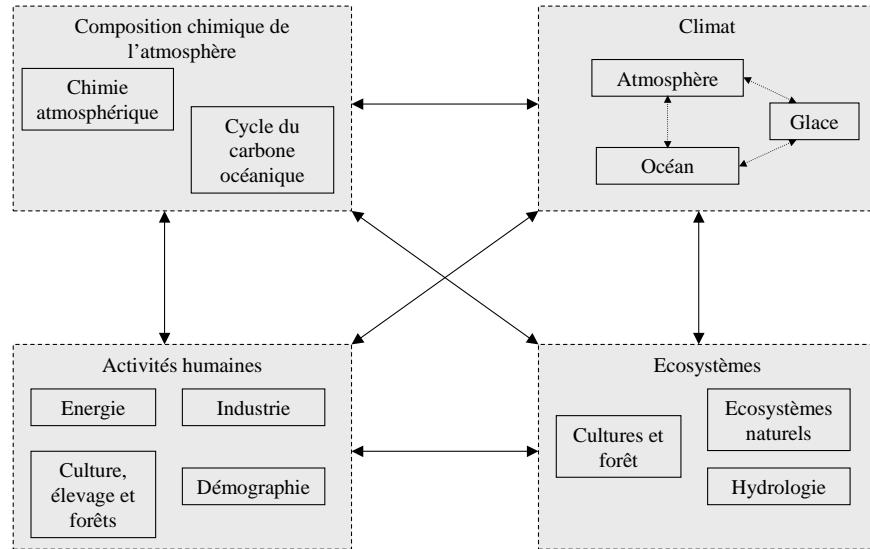


FIG. 1.1 - *Représentation schématique des composantes d'un modèle d'impacts intégré appliquée au changement climatique*

travers les variables d'impact du modèle (température, carte de végétation, productivité des cultures, niveau de la mer,...). Ces impacts peuvent eux-mêmes avoir un effet en retour sur l'évolution économique. Ce type de modèles permet de comparer les impacts de différentes politiques. En revanche, il ne permet pas de rechercher une politique optimale pour rester dans des limites d'acceptabilité des impacts du changement climatique.

Pour cela, les modèles intégrés d'optimisation ont été développés (FUND, MESSAGE4). Dans ces modèles, le nombre de paramètres à fixer est restreint à quelques variables clefs qui contrôlent l'évolution du système climat-économie (par exemple, les niveaux d'émissions ou bien les coûts des taxes sur les émissions). Les valeurs de ces paramètres sont déterminées dans une procédure d'optimisation pour atteindre des objectifs clairement définis en terme d'impacts. Plusieurs types de critères d'optimalité ont été utilisés. Par exemple, l'optimisation peut être basée sur un système coût/bénéfice, en décidant par exemple que le coût des mesures de réductions des émissions doit être égal au bénéfice engendré par ces réductions.

Généralement, les modèles d'évaluation utilisent des modules économiques assez simples et mettent l'accent sur les processus physiques, en particulier la modélisation des impacts. Inversement, les modèles d'optimisation sont plutôt le fruit du travail d'économistes et mettent l'accent sur les sciences sociales. Cette deuxième approche nécessite des modules

climatiques et d'impact relativement simples pour permettre les calculs d'optimisation. Cette différence se caractérise par une approche très différente de la modélisation des impacts. Dans les modèles d'optimisation, les impacts sont calculés en terme monétaire (par exemple, le coût des dommages engendrés par une certaine élévation du niveau de la mer). La difficulté consiste alors à quantifier monétairement les impacts naturels. D'un autre côté, les modèles d'évaluation sont plus souvent basés sur les processus physiques. Ils calculent les impacts en unités physiques, qui n'interfèrent que sur les modèles physiques, et donnent peu souvent lieu à des rétroactions sur les modules économiques, pour lesquels il faudrait les quantifier monétairement.

Le modèle issu du projet ICLIPS (Toth *et al.*, 2003) propose une approche nouvelle qui réconcilie les deux précédentes. Il peut être utilisé en mode direct comme un modèle d'évaluation ou en mode inverse. Dans ce deuxième cas, il réalise une intégration du futur vers le présent en déterminant les conditions nécessaires pour rester dans une limite d'acceptabilité des impacts (Tolerable windows approach). Dans le deuxième cas, le cœur du modèle est identique, mais certains modules sont simplifiés pour permettre l'intégration inverse.

La validation des modèles d'impacts intégrés représente dans tous les cas une difficulté majeure. Elle consiste essentiellement à valider les différents modules constitutifs de façon indépendante du système global. De plus, la validation porte sur la représentation de la période actuelle, et peut difficilement répondre à la question de son applicabilité à la modélisation du futur.

1.1.3 Tendance actuelle

Pour les modèles d'optimisation, la tendance actuelle est de prendre en compte de plus en plus d'impacts du changement climatique. Ainsi, les versions les plus récentes de certains modèles (MERGE4, WIAGEM) évaluent les impacts économiques directs (tels que la productivité des cultures ou la déforestation,...) mais aussi des impacts indirects (comme les effets sur la santé, la biodiversité,...). Ces modèles utilisent des fonctions de transfert entre intensité du changement climatique et intensité des impacts au niveau régional. En revanche, la paramétrisation du changement climatique reste souvent réduite à une simple fonction de transfert entre augmentation de la concentration en CO₂ et augmentation de la température globale.

Parallèlement, les modèles de type évaluation sont de plus en plus complets et de plus en plus détaillés. L'augmentation des moyens de calcul rend possible l'inclusion de processus supplémentaires. Par exemple, le modèle IGSM développé au MIT inclut une paramétrisation du cycle de l'azote dans son module sur les écosystèmes continentaux. Un

Modèles de type optimisation :

MESSAGE*	International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA)	Riahi et Roehrl (2000)
MARIA*	Science University of Tokyo	Mori (2000)
MiniCAM*	Pacific Northwest Nat. Laboratories	Edmonds <i>et al.</i> (1996a; 1996b)
MERGE	Electronic Power Research Institute in USA (EPRI)	Manne et Richels (1995); Manne et Richels (2004)
WIAGEM	Scientific Pool of Environmental Economic Disciplines (SPEED)	Kemfert (2002)
DICE et RICE	Yale University	Nordhaus et Boyer (2000)
FUND	Centre for Marine and Climate Research, Hamburg University	Tol (2002b; 2002a)
Dynamic New Earth 21 (DNE21)	Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE)	Fujii <i>et al.</i> (1998)

Modèles d'évaluation :

AIM*	Nat. Institute of Environmental Studies (Japan)	Matsuoka <i>et al.</i> (2001); Jiang <i>et al.</i> (2000)
ASF*	US Environmental protection Agency, Washington DC	Sankovski <i>et al.</i> (2000)
IGSM	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	Prinn <i>et al.</i> (1999); Kamenkovich <i>et al.</i> (2002)
IMAGE2.2*	National Institute for Public Health and the Environment (RIVM)	de Vries <i>et al.</i> (2000)
ICLIPS	Postdam Institute for Climate Impact Research	Toth <i>et al.</i> (2003)

TAB. 1.1 - *Modèles d'impact intégrés documentés. Les noms des modèles utilisés pour calculer les scénario d'émission SRES sont suivis d'une astérisque.*

autre exemple est l'augmentation du nombre des espèces chimiques dont les concentrations sont évaluées.

De leur côté, les équipes de recherche climatique qui développent les modèles de circulation générale (MCG) atmosphérique et océanique tendent actuellement à prendre en compte de plus en plus de phénomènes interactivement. Leur perspective est de mettre en place des modèles ESM (Earth System Models) pour intégrer toutes les composantes physiques du système Terre, en particulier tous les aspects qui participent au cycle du carbone. Par exemple, le projet européen PRISM (Program for Integrated Earth System Modelling) vise à créer des interfaces standard entre les modèles de différentes parties du système climatique pour faciliter ensuite la mise en place d'ESM en couplant ces modèles. Actuellement, en plus des MCGs océanique et atmosphérique, un ESM pourrait contenir un modèle des processus de surface continentale, un modèle de glace de mer, un modèle de biogéochimie marine, ainsi qu'un modèle de chimie atmosphérique. De ce point de vue, les modèles d'impacts intégrés de type évaluation peuvent être considérés comme des précurseurs simplifiés des ESMs. Un ESM est en quelque sorte un type de modèle d'impacts intégré ne représentant que des phénomènes physiques et où les modules simplifiés sont remplacés par des modèles élaborés plus représentatifs des processus physiques. Toutefois, un modèle d'impacts intégré et un ESM ne mettent pas l'accent sur les mêmes phénomènes : un modèle d'impacts intégré est construit autour de la problématique du changement climatique et de l'impact de l'homme sur son environnement, alors qu'un modèle ESM cherche avant tout à représenter le système terrestre physique naturel, les pressions humaines constituant plutôt des contraintes sur le système naturel.

L'évolution de la distribution de la végétation continentale est un des aspects que les ESMs doivent représenter. Cet aspect est important pour deux raisons. D'une part, la végétation contrôle les flux d'eau, d'énergie et de carbone en surface. C'est donc une donnée essentielle pour bien représenter la physique et la chimie de l'atmosphère. D'autre part, la répartition de la végétation risque d'être fortement modifiée dans le futur. Deux facteurs influent sur cette distribution : le climat qui détermine les zones où chaque espèce est susceptible d'exister, et les activités humaines qui conditionnent l'usage des terres. La distribution de la végétation est ainsi un problème dynamique à prendre en compte dans la modélisation du système Terre. Elle a un impact sur le climat et elle est elle-même modifiée par le changement climatique.

Actuellement, certains modèles de surface continentale modélisent la dynamique de la végétation (TRIFFID, VECODE, IBIS, LPJ, HYBRID) (?). Pour cela ils représentent les phénomènes de compétition entre espèces, de mortalité et d'installation. Toutefois, ces modèles ne prennent en compte que la végétation naturelle et ne représentent pas la pression anthropique sur les sols. Or, on observe actuellement une déforestation intense dans les régions tropicales où la pression démographique est forte, et inversement, on

observe plutôt un abandon des terres agricoles aux hautes latitudes. Dans le cadre de la réalisation de scénarios climatiques sur le XXI^{ème} siècle, la pression anthropique devrait s'intensifier. Dans de telles simulations, ne représenter que la végétation naturelle sans prendre en compte l'utilisation humaine des terres ne serait pas du tout réaliste. Cette utilisation des sols a un impact sur les propriétés physiques de la surface (albédo, longueur de rugosité), sur les propriétés physiologiques des plantes (résistance à la transpiration), mais aussi sur le bilan de carbone. Ce dernier aspect est particulièrement important lors de déforestations, puisque cela libère une grande quantité de carbone dans l'atmosphère.

A l'heure actuelle, l'utilisation des sols n'est pas représentée dans les modèles de surface utilisés dans les modèles de climat de circulation générale. Le problème réside dans le fait que l'utilisation des sols dépend de la pression anthropique qui n'est pas représentée dans ces modèles. Pour cette raison, la modélisation de l'évolution de l'utilisation des terres a surtout été testée dans le cadre de modèles intégrés. En effet, ces modèles simulant la démographie et l'économie, ils peuvent évaluer la pression anthropique sur les sols. Toutefois, la plupart de ces modèles évalue l'extension des terres cultivées et des forêts par région suivant une approche simple. Cela leur permet d'évaluer les émissions naturelles en CO₂, CH₄ et N₂O. Seuls IMAGE, AIM et FARM (Darwin, 1998) modélisent la répartition de la végétation naturelle et des cultures en point de grille. AIM ne simule la répartition spatiale des terres que sur l'Asie tandis qu'IMAGE couvre l'ensemble du globe à une résolution de 0.5°.

Dans la perspective de réaliser un scénario climatique du XXI^{ème} siècle en intégrant l'évolution de l'utilisation des cultures dans le MCG du CNRM (ARPEGE/OPA/GELATO/TRIP), IMAGE2.2 a été choisi car il donne une répartition géographique globale des terres cultivées et naturelles. D'autre part, par rapport au modèle FARM, le modèle IMAGE2.2 a fait l'objet de nombreuses études et a participé à l'élaboration des scénarios SRES (Nakicenovic, 2000).

1.1.4 Les scénarios produits

Pour simuler l'évolution future du système terre, les modèles d'impacts intégrés ont besoin que l'on spécifie un certain nombre d'hypothèses quant à l'évolution future de nos modes de vie. Plusieurs types de développement économique et démographique sont ainsi proposés par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat). Ces différentes alternatives ont été regroupées en 4 grandes familles de scénarios, présentées sur le schéma 1.2. Certaines font l'hypothèse que les écarts de développement entre les pays vont s'amoindrir et que les barrières économiques vont disparaître. D'autres, au contraire, supposent plutôt un accroissement du protectionnisme régional et l'accroisse-

ment des disparités de développement entre les pays. Les familles ainsi définies sont en réalité elles-mêmes composées de diverses branches (en particulier la famille A1).

Le rôle des modèles d'impacts intégrés est de fournir des scénarios d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre, et des charges en aérosols sulfatés et carbonés associés à ces familles. Le GIEC a retenu 6 modèles d'impacts intégrés (cf. tableau 1.1) pour fournir des scénarios de référence aux équipes de modélisation climatique (?). Ces dernières utilisent les scénarios produits pour réaliser des simulation climatiques du XXI^{ème} siècle avec les MCG.

1.2 IMAGE2.2

IMAGE2.2 est un des modèles intégrés les plus anciens. La première version du modèle (IMAGE1.0) a été parfois critiquée pour avoir été peu validée. Ce n'est pas le cas des versions plus récentes, le modèle a depuis subi de grandes améliorations et a été validé module par module et globalement (Alcamo *et al.*, 1998). En particulier, plusieurs études de sensibilité ont été réalisées. En comparaison d'autres modèles intégrés, IMAGE2.2 possède un modèle de végétation très élaboré qui accroît considérablement son coût. On peut schématiquement distinguer 5 grandes parties dans le modèle IMAGE2.2 (figure 1.3) : une partie énergie-industrie qui se charge de modéliser les émissions de gaz purement reliées à l'activité humaine, une partie modélisation de l'évolution de la biosphère terrestre et de ses émissions, une partie bilan des émissions et calcul des concentrations associées pour les différentes espèces chimiques prises en compte, une partie climatique qui calcule les changements climatiques induits par ces changements de concentrations et enfin un dernier groupe de modules qui évaluent les conséquences de ce changement climatique (élévation du niveau de la mer, érosion des sols...). Ces différentes étapes sont modélisées suivant des échelles temporelles et spatiales hétérogènes.

Toute simulation du XXI^{ème} siècle réalisée par IMAGE2.2 repose sur un certain nombre d'hypothèses sur le développement économique et démographique à long terme. IMAGE2.2 utilise pour cela les scénarios établis par le GIEC et présentés sur la figure 1.2. Ces scénarios sont transcrits en termes quantitatifs *a priori* et sont une donnée d'entrée du modèles IMAGE2.2. Cette partie correspond à l'encadré rouge du schéma de fonctionnement du modèle (figure 1.3).

1.2.1 Module Energie-Industrie (EIS)

Dans ce module, le scénario macro-économique est appliqué régionalement à l'industrie et à l'énergie. Cette évaluation est réalisée pour les 17 régions IMAGE (cf Annexe C). La

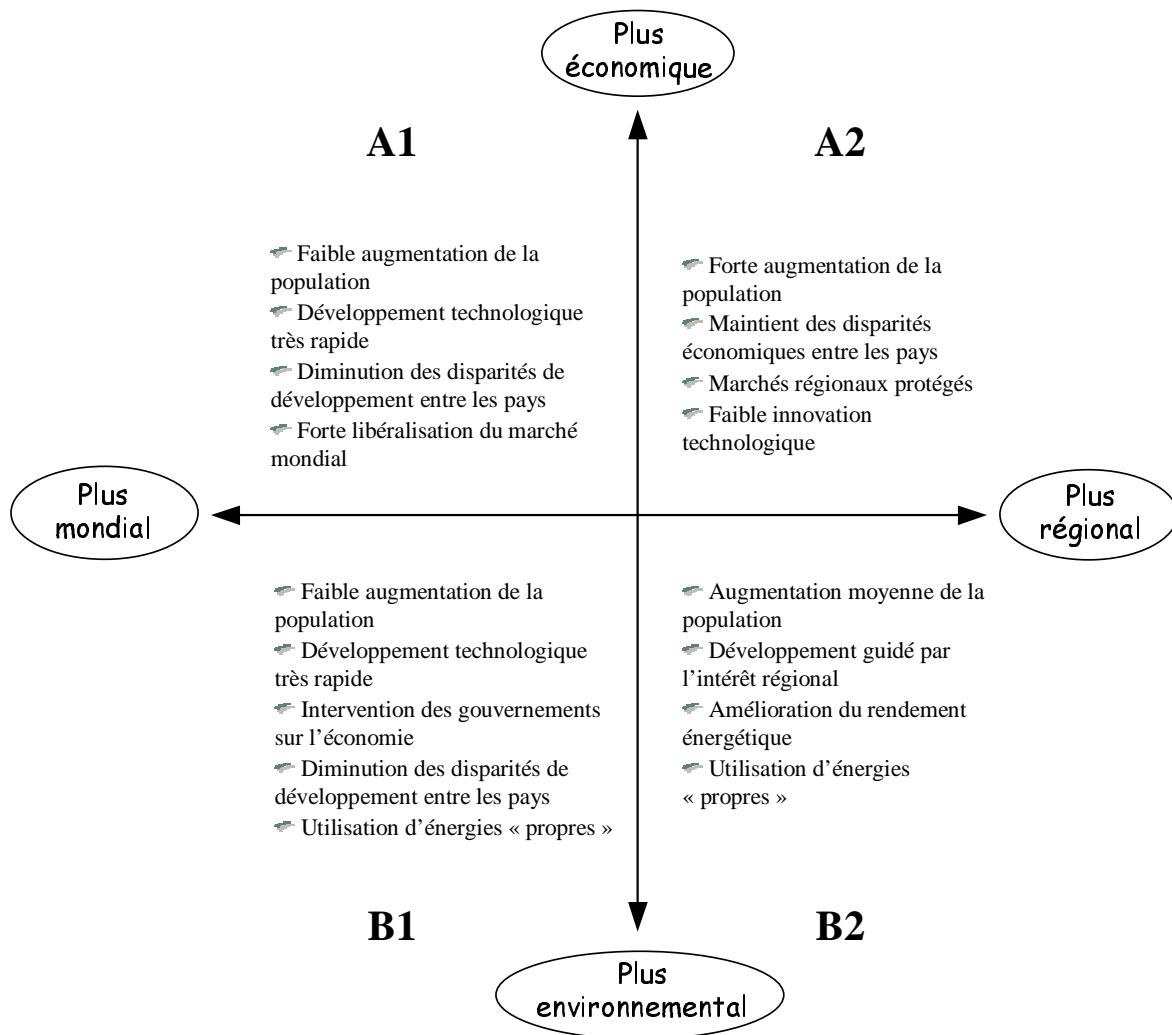


FIG. 1.2 - *Les grandes familles de scénarios proposées par le GIEC.*

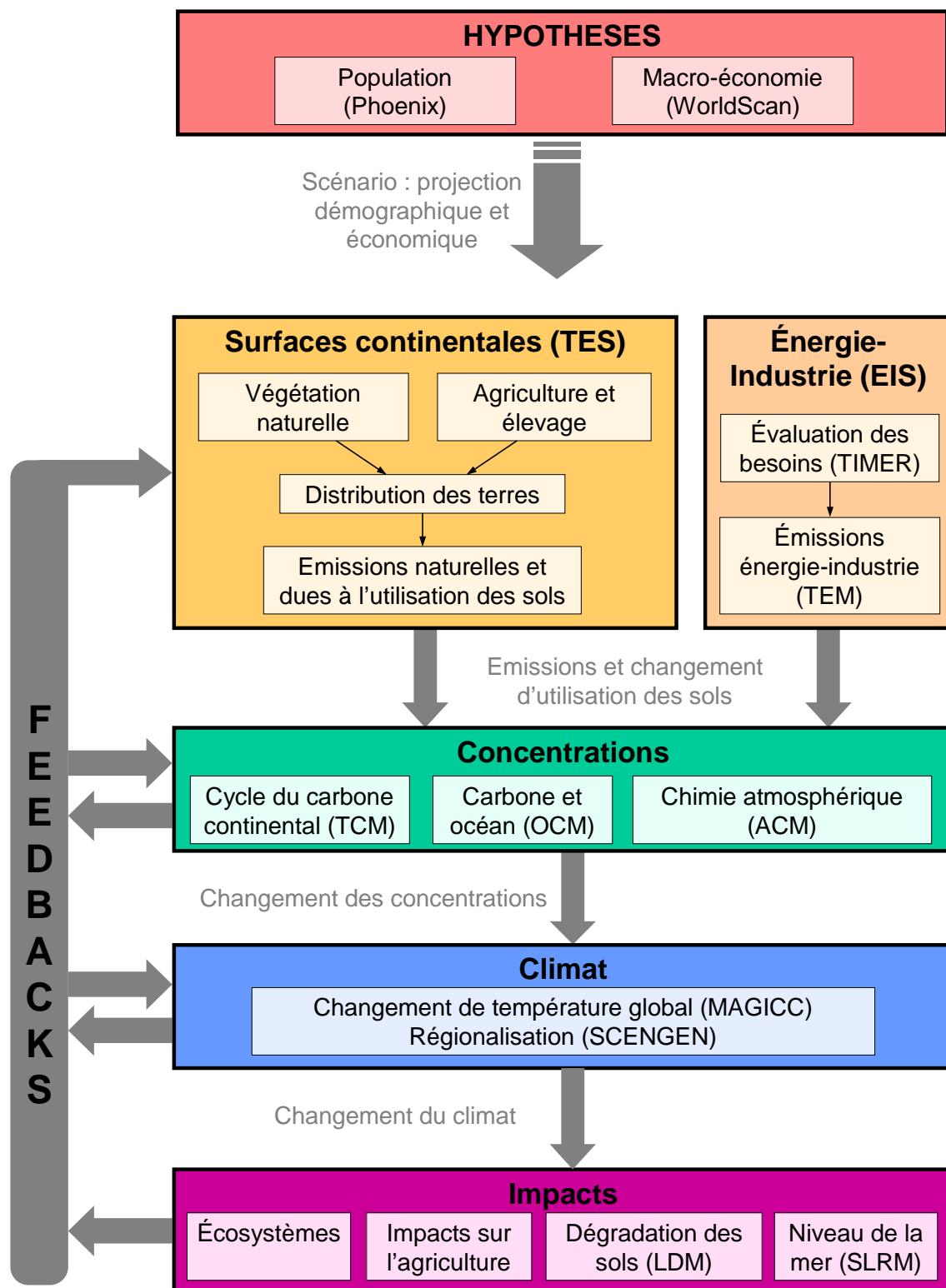


FIG. 1.3 - Schéma de fonctionnement du modèle intégré IMAGE2.2

demande énergétique est évaluée suivant l'activité économique et la démographie prévues. Cette demande est établie suivant 5 secteurs d'activité et différencie deux formes d'énergie : électrique et non-électrique. Le modèle prend en compte des changements possibles de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie, ainsi que la possibilité d'amélioration de son stockage. Les coûts d'extraction et de prospection des combustibles fossiles sont évalués. Parallèlement, la possibilité de mise sur le marché de combustibles dérivés de la biomasse est examinée, suivant l'évolution de la recherche et des coûts de production. De même, pour la production d'électricité, différentes sources d'énergie sont mises en concurrence (centrales de production thermiques, nucléaires, solaires ou éoliennes). Enfin, le modèle simule le commerce de combustibles fossiles et de bio-combustibles entre les 17 régions considérées.

Cela permet de calculer régionalement les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O , CH_4 , et les CFCs) ainsi que des aérosols soufrés. Les émissions calculées dans ce module sont uniquement dues à l'activité industrielle et à la consommation énergétique.

1.2.2 Module d'environnement (TES : Terrestrial Environmental System)

Ce module a pour but de modifier la couverture végétale continentale pour prendre en compte les effets climatiques et anthropiques (déforestation, agriculture,...) sur la répartition de la végétation. Cette étape constitue le «noyau» du modèle.

Ressources nécessaires (calculées tous les ans)

A partir des hypothèses du scénario, le modèle évalue les besoins alimentaires de la population. Cette demande est traduite en quantité de céréales nécessaires (suivant 7 catégories de cultures différentes), en nombre de têtes de bétail devant être élevées (pour 5 espèces animales), ainsi qu'en besoin en bio-combustibles (4 catégories de cultures). Dans la dernière version d'IMAGE, ce calcul est effectué par région mais y est ajoutée la possibilité de transport des ressources d'une région à l'autre (a priori selon des postulats très simples et fixes). D'autre part, si les besoins exprimés ne peuvent pas être totalement satisfaits, la consommation est réévaluée à la baisse en diminuant la demande en produits considérés comme les plus onéreux.

Potentiel des ressources (calculé tous les 5 ans)

Parallèlement, la couverture végétale naturelle potentielle est déterminée sur tout le globe en point de grille ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$). Ceci est réalisé grâce au modèle BIOME (?) qui détermine la végétation à l'équilibre avec un climat donné. Ce modèle nécessite de spécifier le cycle annuel moyen de température et de précipitations. Les données climatiques nécessaires sont ici générées par le module climatique (voir 1.2.4). Un module supplémentaire effectue un bilan hydrique afin de calculer la quantité d'eau disponible dans les réservoirs du sol. La quantité d'eau nécessaire à chaque type de végétation est elle-même modulée par la concentration de CO₂ atmosphérique (pour prendre en compte l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau avec l'augmentation de la concentration en CO₂). Ces bilans permettent de déterminer quelle serait la végétation sans action de l'homme et en supposant un temps suffisant de mise à l'équilibre avec le climat. Cette carte de végétation est dite potentielle et n'est pas considérée comme réaliste.

La carte de végétation potentielle est comparée à la précédente carte de végétation naturelle. Pour les points de grille où il existe des différences, la possibilité de transition naturelle entre les deux types de végétation est évaluée (Van Minnen *et al.*, 2000). Si la migration est réaliste, le point de grille est classé en transition. Les critères de transition sont basés sur la distance de migration et le temps nécessaire à l'installation d'une espèce (vitesse de croissance, de maturation). On obtient finalement une nouvelle carte de végétation naturelle.

De même que pour la végétation potentielle, la productivité potentielle de toutes les terres est évaluée pour les différentes cultures (Leemans et Solomon, 1993). Ce module repose sur le projet AEZ (Agro-Ecological Zones, Fisher *et al.* (2000)) de la FAO (Food and Agriculture Organization). Il détermine d'abord la durée de la saison de croissance en chaque point de grille. Pour chaque culture, si la saison de croissance est assez longue, un modèle simple de photosynthèse/respiration estime sa productivité potentielle. Ce modèle utilise le cycle annuel moyen de température et précipitation déjà utilisé pour calculer la végétation naturelle potentielle. Il est détaillé dans l'annexe B.

Adéquation entre besoins et ressources (calculée tous les ans)

Cette étape vise à distribuer des zones agricoles sur le globe afin de pourvoir aux besoins évalués précédemment. Les terres agricoles sont réparties à l'intérieur de chaque région ; dans un premier temps, les terres déjà cultivées sont réallouées à l'agriculture puis si les besoins ne sont pas couverts, des terres naturelles sont converties en zones agricoles suivant des critères de productivité potentielle maximale, de distance aux terres déjà cultivées, aux zones irriguées et aux grandes zones urbaines. Si au contraire, il y a

Type de source	Hypothèses/Dépendance	échelle						
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	VOC	SO ₂
Rizières	quantité de riz cultivée	L		x				
Bétail	nombre d'animaux	L		x				
Déchets des animaux	nombre d'animaux	L	x	x				
Terres cultivées	engrais et cultures	L		x		x		
Combustion de biomasse par déforestation	fonction de la quantité de CO ₂ produite	R	x	x	x	x	x	x
Feux de savane	% fixé de la superficie des savanes	R	x	x	x	x	x	x
Combustion de déchets cultureaux	production des cultures	R	x	x	x	x	x	x
Décharges	population urbaine	R		x				
Eaux usées	population totale	R		x	x			
Sols sous végétation naturelle	carte de végétation et climat	L		x		x		
Autres sources naturelles	constant	G		x	x	x	x	x
termites, feux, volcans, tourbières, océans, ...								

TAB. 1.2 - *Types d'émissions naturelles et dues à l'utilisation des sols prises en compte dans IMAGE. L'échelle correspond au niveau de précision spatiale auquel est déterminé chaque type d'émission : G=Global, R=Régional, L=Local par point de grille.*

besoin de moins de terres cultivées, alors les parcelles les moins productives recouvrent une végétation naturelle. Il est fait de même avec les pâturages.

Ensuite les besoins en bois calculés dans le module TIMER sont satisfaits en déforêtant. La nature du couvert remplaçant les zones déforestées dépend du scénario et de la région (par exemple, en Europe une déforestation sera suivie d'une replantation tandis que dans les zones tropicales la forêt peut être remplacée par des cultures ou des pâturages, ces deux hypothèses ayant des conséquences très différentes sur le bilan de carbone). Une fois tous les besoins satisfaits, on a donc une nouvelle carte de végétation prenant en compte les effets anthropiques et climatiques. Elle est actualisée tous les 5 ans.

A partir de cette nouvelle répartition des terres, les émissions de différentes espèces chimiques provenant de la biosphère sont calculées tous les ans. Le modèle évalue par exemple les émissions de méthane produites par l'élevage, ou encore la quantité de CO₂

rejetée par la combustion de biomasse lors des déforestations tropicales. Une description complète des types d'émissions pris en compte est donnée dans le tableau 1.2.

1.2.3 Calcul des concentrations

Les émissions produites par l'industrie et la consommation d'énergie ainsi que les émissions naturelles et dues à l'utilisation des sols sont cumulées, et les concentrations résultantes sont évaluées. Le modèle évalue non seulement les concentrations des divers composants atmosphériques participant à l'effet de serre (dont bon nombre de composés chlorés) mais aussi des composants intervenant dans la chimie hétérogène de l'ozone.

Bilan de carbone

A partir de la nouvelle carte de végétation et tout particulièrement des zones classées en transition (qui jouent un rôle majeur ici), un bilan du carbone terrestre est effectué. Pour cela, la production primaire nette (NPP) de la végétation, qui représente le bilan net de carbone assimilé par la végétation, est calculée. Dans les modèles de processus, la NPP est calculée comme la différence entre la photosynthèse et la respiration des plantes. Dans IMAGE2.2, la NPP est paramétrisée directement sans calcul explicite des termes de photosynthèse et de respiration. La formulation utilisée est la suivante :

$$NPP(t) = NPP_v \sum_{mois} \left[f_1(T, v) f_2(HS, v) \left(1 + \beta \ln \frac{CO_2(t)}{CO_2_0} \right) \right] \quad (1.1)$$

avec

$$\beta = \beta_{opt} \min \left(f_3(T, HS) f_4(v, sol, alt), 1 \right) \quad (1.2)$$

La NPP est donc fonction du climat (température T , eau dans le sol HS et concentration en CO_2 atmosphérique) et du type de végétation v . Le terme β est le facteur de fertilisation par le CO_2 et varie entre 0 et 1. Le facteur f_3 permet d'ajuster β en fonction du climat par rapport à un optimum et le terme f_4 permet de prendre en compte les conditions locales (le type de végétation, la fertilité de sol et l'altitude du lieu). NPP_v est la NPP initiale moyenne pour chaque type de végétation, elle est déterminée par des valeurs trouvées dans la littérature.

Le modèle évalue aussi le flux de CO_2 issu de la décomposition de la matière organique dans le sol. La production nette de l'écosystème (NEP), qui est la quantité de CO_2 absorbée par le système sol-végétation, est alors calculée comme la différence entre la NPP et ce flux de respiration du sol. Le modèle simule ainsi les échanges de carbone entre 4 grands réservoirs :

- ▶ la biomasse «vivante», qui est subdivisée en réservoirs avec des durées de vie diverses (branches, feuilles, racines, troncs).
- ▶ la biomasse «morte», qui est elle aussi subdivisée en réservoirs avec des durées de vie diverses (litière, humus, charbon).
- ▶ une catégorie d'utilisation du bois avec une durée de vie de 10 ans (par exemple pour faire de la pâte à papier, ou le bois de chauffage)
- ▶ une catégorie d'utilisation du bois à longue durée de vie (pour la construction, les meubles).

Les deux derniers réservoirs permettent de simuler l'impact de l'exploitation des forêts et des cultures sur le cycle du carbone. Le cycle est alors bien fermé.

Lorsque la végétation change naturellement, la NPP est calculée comme une combinaison linéaire de la NPP du végétal qui disparaît et de celui qui s'implante, les facteurs de la combinaison linéaire évoluant progressivement au cours de la période de transition.

Finalement, 3 rétroactions climatiques sont ainsi prises en compte pour le cycle du carbone continental :

- ▶ la fertilisation par le CO₂.
- ▶ la dépendance de la photosynthèse et de la respiration à la température (courbe en cloche)
- ▶ l'accélération de la décomposition dans le sol due à l'augmentation de la température.

Le flux de CO₂ au niveau des océans est aussi modélisé. La formulation utilisée est basée sur l'approche du modèle du cycle du carbone de l'université de Berne (Bern CC, ? (?)). L'océan est considéré comme un puits de CO₂. La quantité de CO₂ dissout dépend de la température de l'océan et de la concentration atmosphérique en CO₂. Le flux de CO₂ entrant dans l'océan est calculé de manière à établir un équilibre entre les concentrations partielles en CO₂ dans l'atmosphère et dans l'océan.

La concentration atmosphérique en CO₂ est finalement déduite grâce à un bilan des puits et sources de CO₂, quantifiés dans les autres modules. Le bilan comporte cinq termes : deux sources principales, les émissions dues aux activités humaines (comme calculées dans EIS) et les changements de types de couverture végétale (dont la déforestation) et trois termes puits, l'absorption par la végétation, les replantations (en particulier de forêts) et l'absorption par l'océan.

Autres espèces chimiques

Pour toutes les autres espèces chimiques, un bilan est réalisé afin de convertir les taux d'émission en concentration. Pour une espèce chimique donnée, la concentration

est fonction du taux d'émission ainsi que de son temps caractéristique de résidence dans l'atmosphère. Cette durée de vie est considérée comme constante pour la plupart des gaz à effet de serre sauf pour ceux qui sont très réactifs pour lesquels elle est fonction de la concentration troposphérique en OH.

Les évolutions des concentrations troposphériques en OH et en ozone sont déterminées suivant les recommandations du rapport du GIEC de 2001 (? (?), table 4.11). Il est préconisé d'utiliser une interpolation linéaire entre les taux de changement de concentration en CH₄, les taux d'émissions de NOx, CO et VOC et le changement de concentration en OH et en ozone.

Les concentrations des différents gaz sont ensuite converties en équivalent de concentration en CO₂, pour les inclure dans le forçage radiatif. Le calcul du forçage radiatif se fait aussi suivant les recommandations rapport du GIEC qui fournit un coefficient de proportionnalité entre concentration et forçage radiatif adapté à chaque espèce. Parmi ces espèces, la majorité contribue à un réchauffement de l'atmosphère (CH₄, N₂O, HFC, PFC, Halons, ozone troposphérique, vapeur d'eau, et aérosols -carbones suies et carbones organiques-) tandis que certaines engendrent un refroidissement (ozone stratosphérique, aérosols sulfatés (par effet direct et indirect) et aérosols issus de la combustion de la biomasse).

1.2.4 Module climatique

Modèle de climat

Un modèle climatique simple est utilisé pour évaluer l'impact de ces changements de concentration sur la température globale. Il est identique à celui utilisé dans le modèle MAGICC (Hulme *et al.*, 2000) qui est le modèle simple le plus utilisé dans le rapport du GIEC de 2001. Son implémentation dans IMAGE est décrite par Eickhout *et al.* (2001). Il comprend un modèle atmosphérique de bilan radiatif et un modèle de diffusion/upwelling pour l'océan.

Le modèle est constitué d'une boîte pour l'atmosphère, de deux boîtes pour les continents et de deux boîtes pour l'océan. Les deux boîtes respectives représentent les deux hémisphères. Les boîtes océaniques contiennent 40 niveaux, dont la couche supérieure dite de mélange, absorbe le rayonnement. On considère que les continents n'absorbent pas d'énergie. Le bilan d'énergie est décrit par l'équation :

$$\Delta Q = \lambda \Delta T + \Delta F \quad (1.3)$$

où ΔQ est le changement de forçage radiatif, ΔF le changement du flux de chaleur net vers l'océan et ΔT le changement de température global en surface.

Le paramètre λ correspond à l'inverse de la sensibilité climatique. Il est traditionnellement défini par la formulation :

$$\lambda = \frac{\Delta Q_{2\times CO_2}}{\Delta T_{2\times CO_2}} \quad (1.4)$$

où $\Delta Q_{2\times CO_2}$ représente le forçage radiatif induit par un doublement de la concentration en CO₂ et $\Delta T_{2\times CO_2}$ le changement de température associé. Ce paramètre clef est très incertain ; le rapport du GIEC de 2001 propose une fourchette de valeurs possibles entre 1.5° et 4.5°. L'intérêt de tels modèles simplifiés est de pouvoir tester plusieurs valeurs de ce paramètre comme cela a été fait pour certains scénarios IMAGE de référence (IMAGE-team, 2001a).

L'énergie absorbée par les océans est transportée par diffusion et upwelling. On considère que l'intensité de l'upwelling décroît avec la température de l'océan pour simuler un ralentissement de la circulation thermohaline. Une correction finale est apportée au changement de la température de surface pour prendre en compte l'effet des surfaces couvertes de glace non simulées par le modèle. Ces paramétrisations ont été établies pour reproduire le mieux possible le comportement du modèle d'océan du HadCM2.

Régionalisation du changement climatique

La partie environnement du modèle IMAGE a besoin de cartes de changement de température et de précipitations climatiques mensuelles sur une grille de 0.5°×0.5°. Une étape de désagrégation spatiale et temporelle est ainsi nécessaire. Le méthode employée est similaire à celle utilisée par le modèle SCENGEN (Hulme *et al.*, 2000) associé à MAGICC. La méthode consiste à utiliser des simulations préalables réalisées par des MCGs. Les disparités de réponse géographique et temporelle observées dans les simulations des MCGs servent de motif («pattern») de régionalisation pour évaluer la réponse locale associée au changement global calculé dans le modèle climatique simple. Par défaut, IMAGE utilise les résultats d'expériences de doublement de CO₂ à l'équilibre. Ces expériences fournissent un motif de changement de température correspondant à une augmentation de la concentration en GHGs.

Pour prendre en compte l'effet des aérosols sulfatés sur le motif, l'approche proposée par Schlesinger *et al.* (2000) est utilisée. Elle consiste à rajouter une composante régionale au motif suivant les émissions régionales d'aérosols simulées. Le module de régionalisation est décrit plus en détail dans le chapitre suivant.

Cette description du modèle IMAGE2.2 présente un aperçu du niveau de détail pris en compte. Comme pour l'ensemble des modèles d'impacts intégrés, les paramétrisations employées sont souvent jugées trop simples et de nombreux facteurs sont négligés. Aussi,

lors de l'utilisation d'un tel modèle, il ne faut pas négliger ces limitations. La modélisation de l'économie du futur est en elle-même un challenge.

Chapitre 2

Introduction d'un forçage climatique plus réaliste dans IMAGE2.2

Dans ce chapitre, on analyse la sensibilité d'IMAGE au changement climatique simulé. En particulier, on s'attache à évaluer l'impact de l'utilisation d'un signal climatique plus détaillé que celui normalement produit par IMAGE.

2.1 Modélisation du climat dans IMAGE2.2

2.1.1 Méthode de régionalisation

Comme cela a été décrit au chapitre précédent, le module climatique d'IMAGE2.2 comporte deux étapes : un modèle de bilan radiatif qui détermine l'évolution de la température moyenne globale, puis ce changement global est spatialisé grâce à un motif issu de simulations par des MCGs. Par défaut, le schéma de régionalisation est celui fourni par une simulation à l'équilibre de type $2\times\text{CO}_2$. Dans la suite on utilise les conventions de notation suivantes : \bar{Y} est une moyenne temporelle, $\langle Y \rangle$ est une moyenne spatiale, Y^G est une donnée issue de MCG et Y^I est issue du module de climat simple d'IMAGE. Le motif de régionalisation $\Delta\bar{T}^G(m, x)$ pour le mois m et au point x , est calculé suivant la formule :

$$\Delta\bar{T}^G(m, x) = \bar{T}_{2\times\text{CO}_2}^G(m, x) - \bar{T}_{1\times\text{CO}_2}^G(m, x) \quad (2.1)$$

où $\bar{T}_{2\times\text{CO}_2}^G(m, x)$ est la température moyenne d'une simulation pluriannuelle à l'équilibre avec une concentration en CO_2 doublée par rapport à une simulation de référence.

Pour l'année y , on note ΔT_y^I le changement de température global par rapport à 1990 simulé par le module radiatif d'IMAGE. Le modèle IMAGE calcule alors le changement de température au point x pour le mois m et l'année y suivant la formule :

$$T_y(m, x) = T_{1990}(m, x) + \frac{\Delta T_y^I}{\langle \Delta \bar{T}^G \rangle} \times \Delta \bar{T}^G(m, x) \quad (2.2)$$

$\langle \Delta \bar{T}^G \rangle$ représente le changement de température global en moyenne annuelle dans la simulation du MCG. Le motif fournit donc la répartition spatiale du changement de température et son cycle annuel à partir du changement de température en moyenne globale annuelle. Le module de régionalisation est appelé tous les 5 ans, avant de réactualiser la carte de végétation.

Cette méthode est utilisée par plusieurs modèles d'impacts intégrés (MESSAGE, MiniCAM, New Earth 21, SCENGEN, AIM). Elle est fondée sur le fait que pour toutes les expériences de changement de la concentration en CO₂ dans des MCGs, on obtient un motif de changement de température stable et qui est relativement peu affecté par l'intensité du réchauffement.

Afin d'illustrer le fonctionnement de la méthode de régionalisation par un motif, la figure 2.1 présente un exemple simple d'application. Ici, le motif est évalué à partir d'une simulation scénario de type A2 réalisée avec AOG. On le calcule comme étant l'anomalie moyenne de température entre 2 périodes de 30 ans prises au début et à la fin du scénario, soit :

$$\Delta \bar{T}^G(m, x) = \bar{T}_{[2070-2099]}^G(m, x) - \bar{T}_{[1970-1999]}^G(m, x) = \Delta \bar{T}_{fig(a)} \quad (2.3)$$

Ce motif est présenté sur la figure 2.1a pour les mois de janvier et de juillet, et la moyenne annuelle de l'anomalie est de 3.25°C. Nous avons aussi calculé l'anomalie de température moyenne de la période 2050-2079 par rapport à 1970-1999 pour les mois de janvier et juillet (figure 2.1b). A cette période, l'anomalie de la moyenne globale annuelle de température de surface est de 2.2°C. La figure 2.1c représente le motif de la figure (a) appliqué à cette anomalie moyenne globale de 2.2°C, suivant la relation de proportionnalité simple :

$$\Delta \bar{T}_{fig(c)} = \frac{2.2}{3.25} \times \Delta \bar{T}_{fig(a)} \quad (2.4)$$

La comparaison des figures (b) et (c) permet ainsi d'évaluer l'erreur qui est faite en utilisant la méthode de régionalisation d'IMAGE. On observe dans les deux cas un gradient positif de réchauffement de l'équateur vers les pôles. L'aspect général du réchauffement est plutôt cohérent en utilisant la méthode IMAGE. Toutefois, la méthode IMAGE simule des cartes plus lissées et moins contrastées. Ainsi, si le motif sur l'Afrique est effectivement très comparable, le plus faible réchauffement sur le sud-est en janvier est moins marqué sur la carte produite par IMAGE que sur celle produite directement par AOG. De même, le fort

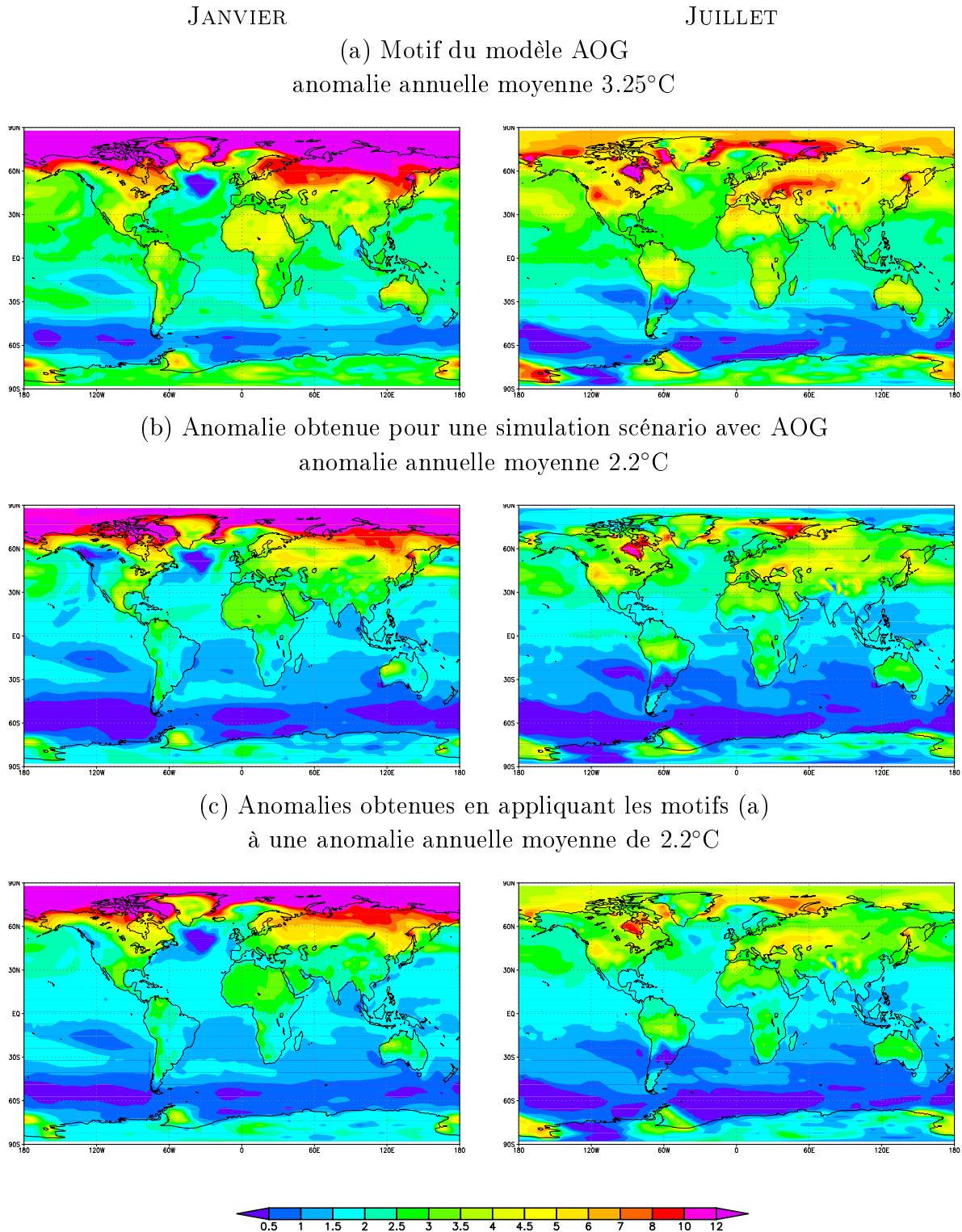


FIG. 2.1 - (a) Exemple de motif de température de surface obtenu pour le modèle AOG à partir d'une simulation scénario, en calculant l'anomalie des moyennes sur les périodes 2070-2099 et 1970-1999. (b) Anomalie obtenue à partir de la même simulation mais pour la période 2050-2079 par rapport à 1970-1999. (c) Anomalie obtenue en appliquant le motif présenté en (a) à l'anomalie de 2.2°C .

gradient de réchauffement obtenu du nord-ouest au sud-ouest de l'Amérique du nord n'est pas très bien reproduit par la méthode du motif. Pour cette zone, la variabilité étant assez forte, le motif ne semble pas être fixe comme le présuppose la méthode IMAGE. En juillet, on constate que les anomalies obtenues en Arctique sont également trop peu contrastées avec la méthode du motif. On vérifie toutefois que la méthode utilisée par IMAGE, et par beaucoup d'autres modèles d'impacts intégrés, donne des résultats raisonnables en particulier sur les continents.

Par défaut, IMAGE utilise le motif de changement climatique fourni par une simulation du modèle HadCM2 du Hadley Center (?), et une sensibilité climatique moyenne $\frac{1}{\lambda} = 2.5^\circ$. L'équipe du RIVM a aussi réalisé des simulations avec des motifs issus d'autres MCGs afin de mettre en évidence la sensibilité du modèle au schéma de régionalisation du changement climatique (IMAGE-team, 2001b).

Pour les précipitations, le modèle fait l'hypothèse que le taux de changement correspond à celui des températures :

$$P_y(m, x) = P_{1990}(m, x) + \frac{\Delta T_y^I}{\langle \Delta \bar{T}^G \rangle} \times \Delta \bar{P}^G(m, x) \quad (2.5)$$

La figure 2.2 montre le motif obtenu pour le modèle AOG, ainsi que son application sur le même exemple que pour les températures. La localisation des anomalies semble bien reproduite, indiquant que le motif d'anomalies des précipitations est effectivement assez fixe au cours du temps. En revanche, l'intensité des anomalies simulées par IMAGE est trop faible. L'hypothèse du taux de changement des précipitations proportionnel au taux de changement des températures n'est pas tout à fait vérifiée. La méthode utilisée ne semble ainsi pas aussi justifiée que pour les températures. Dans le modèle intégré IAM, on utilise le même type d'approche mais pour le logarithme des précipitations. Il en résulte que l'anomalie de précipitation augmente exponentiellement avec l'augmentation globale de la température.

2.1.2 Indices climatiques utilisés

Les différents indices climatiques calculés par le modèle IMAGE2.2 à partir des cartes de température et précipitation sont détaillés dans l'annexe A. Parmi ces indices, la saison de croissance joue un rôle très important pour la végétation. La saison de croissance est définie comme l'intersection de la saison chaude et de la saison humide. La saison chaude correspond à la période de l'année où la température excède 5°C ; la saison humide débute quand la précipitation mensuelle dépasse la moitié de l'évaporation potentielle mensuelle et finit lorsque le réservoir est vidé à 90%.

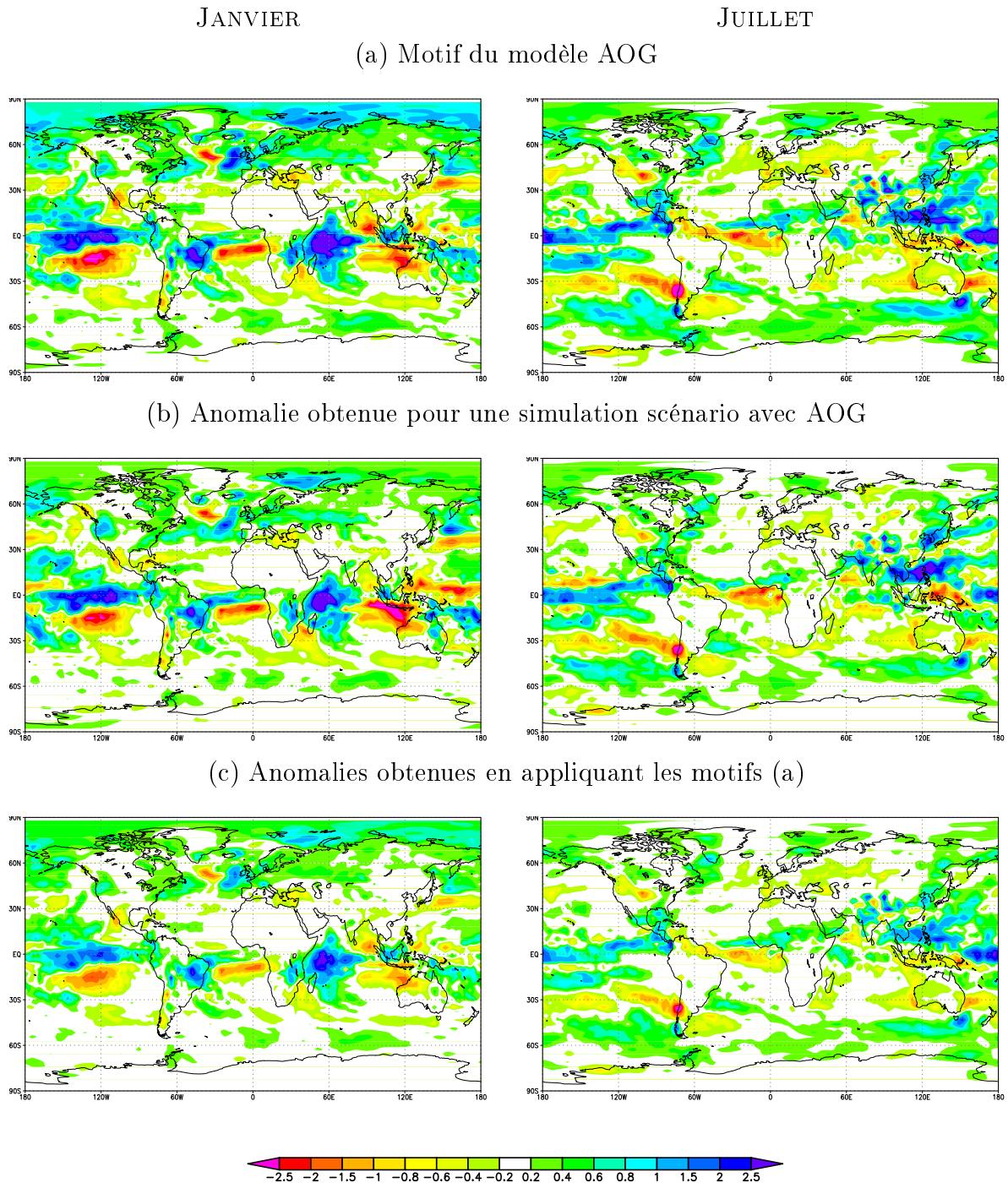


FIG. 2.2 - *Idem figure 2.1 pour les précipitations, en utilisant les rapports de températures moyennes globales comme facteur de proportionnalité pour obtenir la figure (c) à partir de la figure (a).*

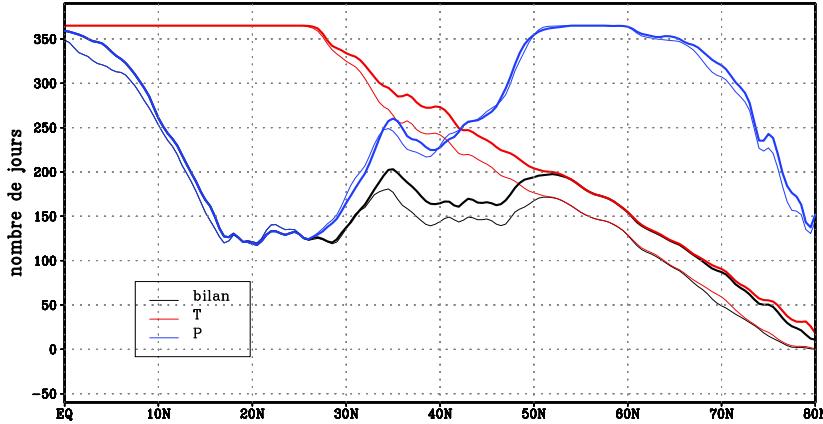


FIG. 2.3 - *Moyennes zonales du nombre de jours de la saison chaude (en rouge), de la saison humide (en bleu), et de la saison de croissance résultante (en noir) pour les années 1970 (en trait fin) et 2100 (en trait gras).*

Cette définition permet de traiter de la même façon toutes les régions du globe, que la croissance des végétaux y soit limitée par la température ou par l'humidité. Toutefois, elle ne donne qu'une représentation grossière du comportement de la végétation. ? (?) a montré qu'une détermination fine des dates de démarrage du cycle végétatif était complexe et nécessitait l'utilisation de paramétrisations différentes selon les biomes. Bien que plus simple, la paramétrisation utilisée dans IMAGE permet de reproduire le gradient zonal de la durée du cycle végétatif ainsi que son évolution grossière en fonction du changement climatique simulé. Comme l'illustre la figure 2.3, la végétation des régions tropicales est surtout contrainte par la disponibilité en eau, tandis que celle des hautes latitudes est limitée par la saison chaude. Lorsque l'on fait varier le forçage climatique, les changements de la température auront essentiellement un impact aux hautes latitudes, tandis que les changements de précipitation seront importants dans les zones tropicales. Entre 30° et 50° se situe la zone de transition où les deux facteurs sont limitants. Pour la zone équatoriale, la saison de croissance correspond à la saison humide qui dure presque toute l'année. Pour le scénario présenté ici, l'augmentation de température se traduit par un accroissement de la durée de la saison de croissance partout sauf dans les régions tropicales. L'analyse de l'impact des changements de précipitation ne peut s'effectuer que grossièrement sur ce type de moyenne zonale puisque les anomalies de précipitations ont une forte variabilité spatiale.

2.2 Expériences de sensibilité réalisées

2.2.1 Principe

Dans l'optique de remplacer le module climatique d'IMAGE par un MCG, différentes expériences de sensibilité au changement climatique ont été réalisées. Il s'agit ici de «débrancher» progressivement le module climatique d'IMAGE et de remplacer les informations qu'il fournissait par des résultats de simulations de MCG réalisées indépendamment. Ces différents tests permettent par ailleurs de bien décomposer les différents aspects du forçage et leurs impacts sur la modélisation d'IMAGE. Les tests sont effectués suivant une démarche progressive en utilisant au fur et à mesure de plus en plus d'informations issues du MCG au lieu de celles fournies par le module climatique simplifié. Il est cependant à noter que cette démarche logique va aussi à l'encontre de l'interactivité entre les différents modules du système intégré puisque les changements climatiques imposés par le MCG constituent un forçage non interactif avec la simulation IMAGE. Ceci permet surtout d'analyser en détail la sensibilité d'IMAGE au changement de climat simulé et de vérifier que les changements simulés par ARPEGE/OPA/GELATO (AOG) sont «compatibles» avec IMAGE. On rétablira l'interactivité entre le changement climatique simulé et la modélisation IMAGE (répartition des cultures, émissions, ...) lorsque l'on réalisera le scénario couplé AOG/IMAGE. Dans cette partie, on se limite à étudier l'impact de l'introduction d'un forçage climatique venant de AOG plutôt que du module climatique d'IMAGE.

Les tests sont réalisés suivant la séquence suivante (la figure 2.4 schématise les trois premières étapes) :

- ▶ Étape 1 : changement du motif de régionalisation $\Delta\bar{T}^G(m, x)$.
- ▶ Étape 2 : modification de la sensibilité au forçage radiatif en utilisant la sensibilité de AOG (modification de $\langle \Delta\bar{T}^G \rangle$).
- ▶ Étape 3 : utilisation du taux de changement de climat simulé par AOG. Dans ce cas on fait évoluer le motif de changement climatique au cours de la simulation comme il a évolué dans une simulation scénario réalisée avec AOG, et le terme $\frac{\Delta T_y^I}{\langle \Delta T^G \rangle} \times \Delta\bar{T}^G(m, x)$ est remplacé par l'anomalie fournie par le modèle AOG.
- ▶ Utilisation des TSMs simulées par AOG.
- ▶ Introduction des variations de la nébulosité au cours d'une simulation scénario réalisée avec AOG.

Dans la suite de cette partie, chaque étape de modification du forçage climatique est examinée. A chaque fois, quelques diagnostics représentatifs des changements imposés sont étudiés. Leur analyse permet de mieux rendre compte du niveau de détail de la modélisation. Cela permet aussi de mettre en évidence quelques diagnostics clefs. Une vision plus

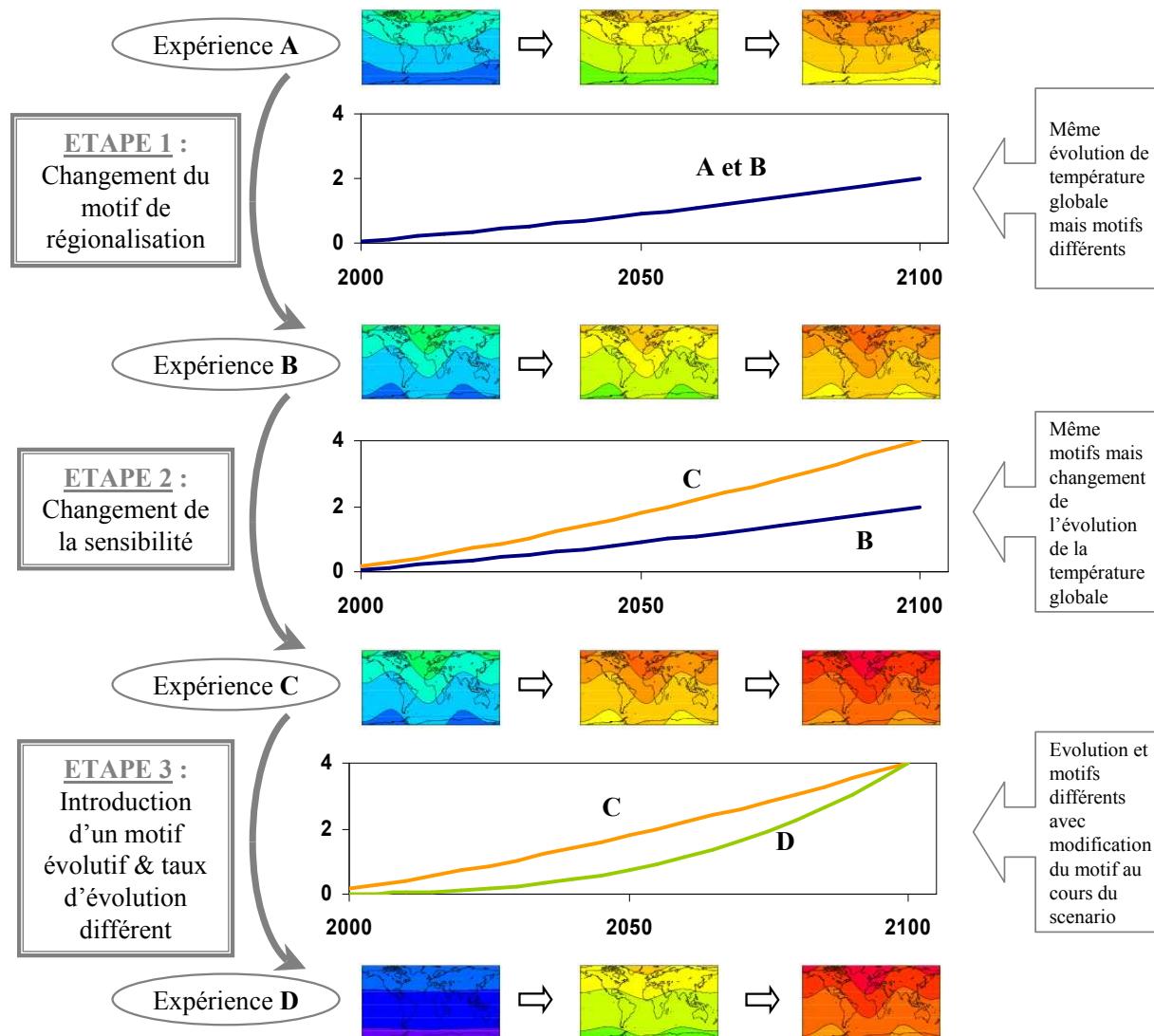


FIG. 2.4 - Schéma des expériences de sensibilité réalisées avec IMAGE.

Nom de la simulation	Description
HADCM2	Motif du modèle HadCM2 (simulation par défaut)
GFDL	Motif du modèle GFDL
AOG	Motif du modèle AOG
AOG sens	Motif et sensibilité du modèle AOG
AOG 10	Utilisation des anomalies transitoires de T et P d'une simulation scénario de AOG, calcul par moyennes glissantes sur 10 ans
AOG 30	Idem AOG 10 mais avec des moyennes sur 30 ans
AOG + TSM	Idem AOG 30 avec forçage par les TSMs de AOG
AOG + Neb	Idem AOG + TSM avec évolution de la nébulosité suivant le scénario du AOG
SCC	Pas de prise en compte du changement climatique par la végétation (naturelle et cultures), seule l'évolution du CO ₂ influe sur la végétation

TAB. 2.1 - *Tableau récapitulatif des simulations IMAGE réalisées*

globale de toutes les expériences sera proposée dans la section suivante. Le tableau 2.1 récapitule l'ensemble des expériences réalisées. Parmi celles-ci, l'expérience SCC est une simulation de référence pour laquelle on considère qu'il n'y a pas d'évolution de la température et des précipitations. Dans cette simulation, la végétation évolue uniquement sous l'influence du changement de concentration en CO₂.

Ces tests sont réalisés principalement sur un scénario A2 car c'est le scénario pour lequel le changement climatique est le plus fort et les tests de sensibilité sont ainsi plus faciles à interpréter. Pour cela, nous disposons d'une simulation climatique couvrant la période 1950-2100 avec AOG suivant le scénario d'émission A2 du GIEC.

2.2.2 Changement du motif

Cette expérience permet de mettre en évidence la sensibilité des simulations IMAGE au choix du motif de régionalisation. On dispose du motif par défaut utilisé dans IMAGE (celui du modèle HadCM2), de celui du modèle GFDL et de celui de AOG. Pour le modèle AOG, on ne dispose pas d'expérience de sensibilité de type 2×CO₂, on utilise à la place une expérience de scénario climatique sur le XXI^{ème} siècle. Le motif est alors calculé comme étant l'anomalie entre la moyenne climatique sur la période 2070-2099 par rapport à la période 1960-1989. L'équation 2.1 est alors remplacée par l'expression suivante :

$$\Delta\bar{T}^G(m, x) = \bar{T}_{2070-2099}^G(m, x) - \bar{T}_{1960-1989}^G(m, x) \quad (2.6)$$

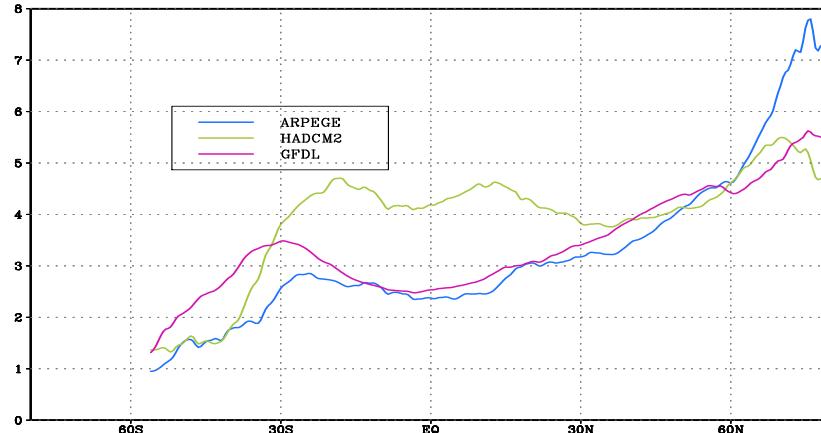


FIG. 2.5 - *Moyenne zonale des anomalies de température en moyenne annuelle entre 2100 et 1990 sur les continents (la moyenne globale de chaque expérience est identique dans les trois cas).*

Comme schématisé à la figure 2.4, on ne modifie que le motif de régionalisation, le taux de changement de température globale est identique pour les trois simulations.

Pour la température et pour les trois motifs, on observe un réchauffement généralisé sur les continents. Les moyennes zonales des anomalies montrent une répartition du réchauffement plus ou moins homogène selon les modèles (figure 2.5). En moyenne annuelle, le modèle AOG simule un réchauffement fort, supérieur à 6°C aux hautes latitudes, et un réchauffement moyen de 2°C aux latitudes tropicales. Le motif des anomalies de température du HadCM2 est plus homogène, avec un réchauffement de l'ordre de 4°C à toutes les latitudes. Pour les trois modèles, le fort réchauffement simulé aux hautes latitudes correspond à un réchauffement hivernal (figure 2.6), qui est dû à une diminution de l'extension de la calotte polaire en hiver. Le modèle du GFDL se distingue des deux autres en ne simulant pas de très fort réchauffement sur le nord-est de l'Asie.

La carte des anomalies de précipitations en 2100 est assez différente d'un modèle à l'autre. D'une part, l'amplitude des changements de précipitations est plus forte pour HadCM2 que pour les deux autres modèles. Cela met en évidence une plus grande sensibilité du cycle de l'eau aux GHGs dans HadCM2. D'autre part, les impacts régionaux ne sont pas toujours cohérents. En particulier sur le nord de l'Inde, en juillet, HadCM2 simule une forte diminution des précipitations alors que les deux autres modèles simulent une hausse. De même, sur le nordeste du Brésil, se sont HadCM2 et AOG qui simulent une augmentation des précipitations en janvier, tandis que GFDL simule une baisse. L'augmentation des précipitations aux moyennes et hautes latitudes en janvier est, en revanche, un aspect commun des trois modèles.

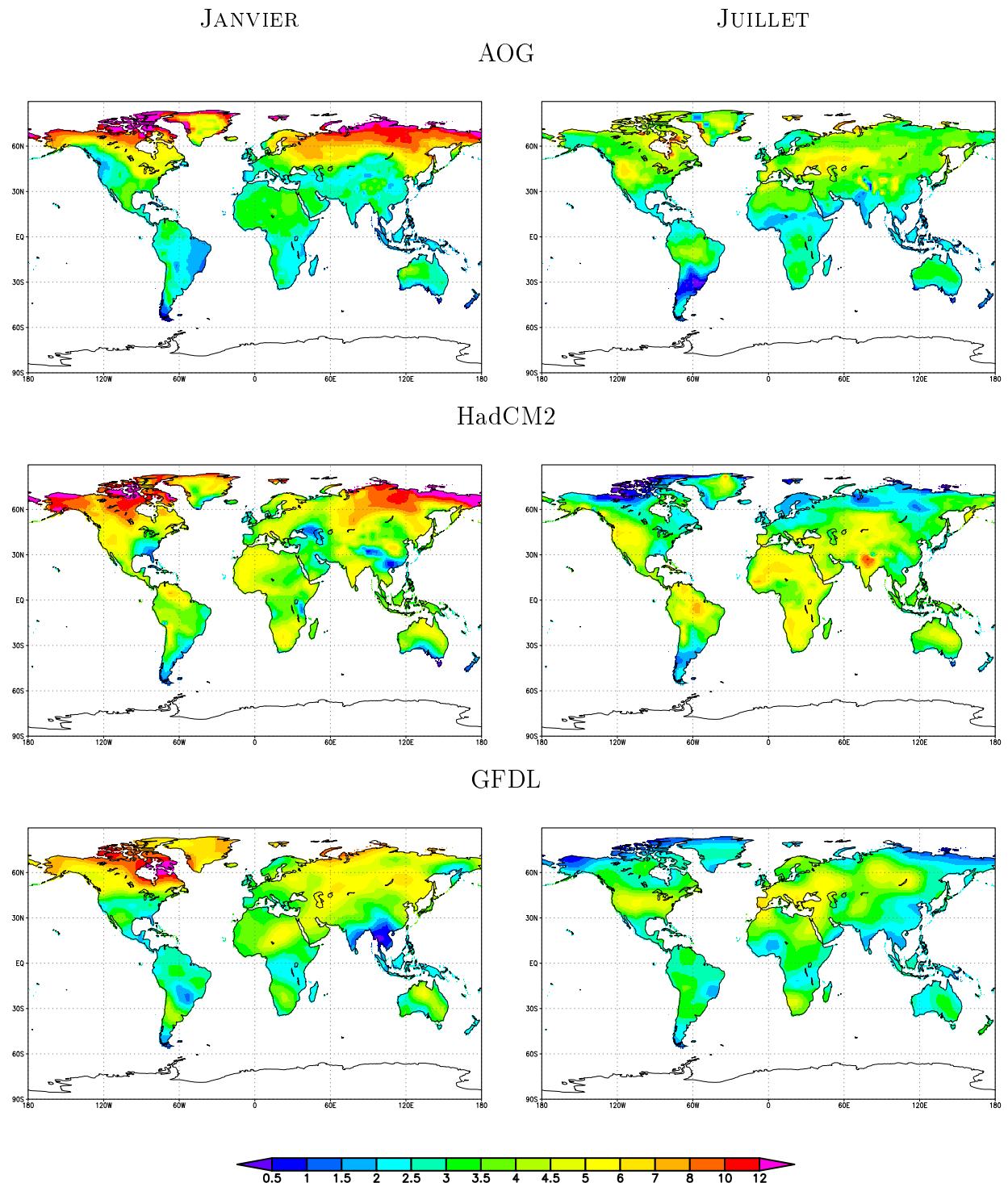


FIG. 2.6 - Anomalies de température à 2 mètres en janvier et juillet en 2100 par rapport à 2000, pour les motifs de AOG, du HadCM2, et du GFDL.

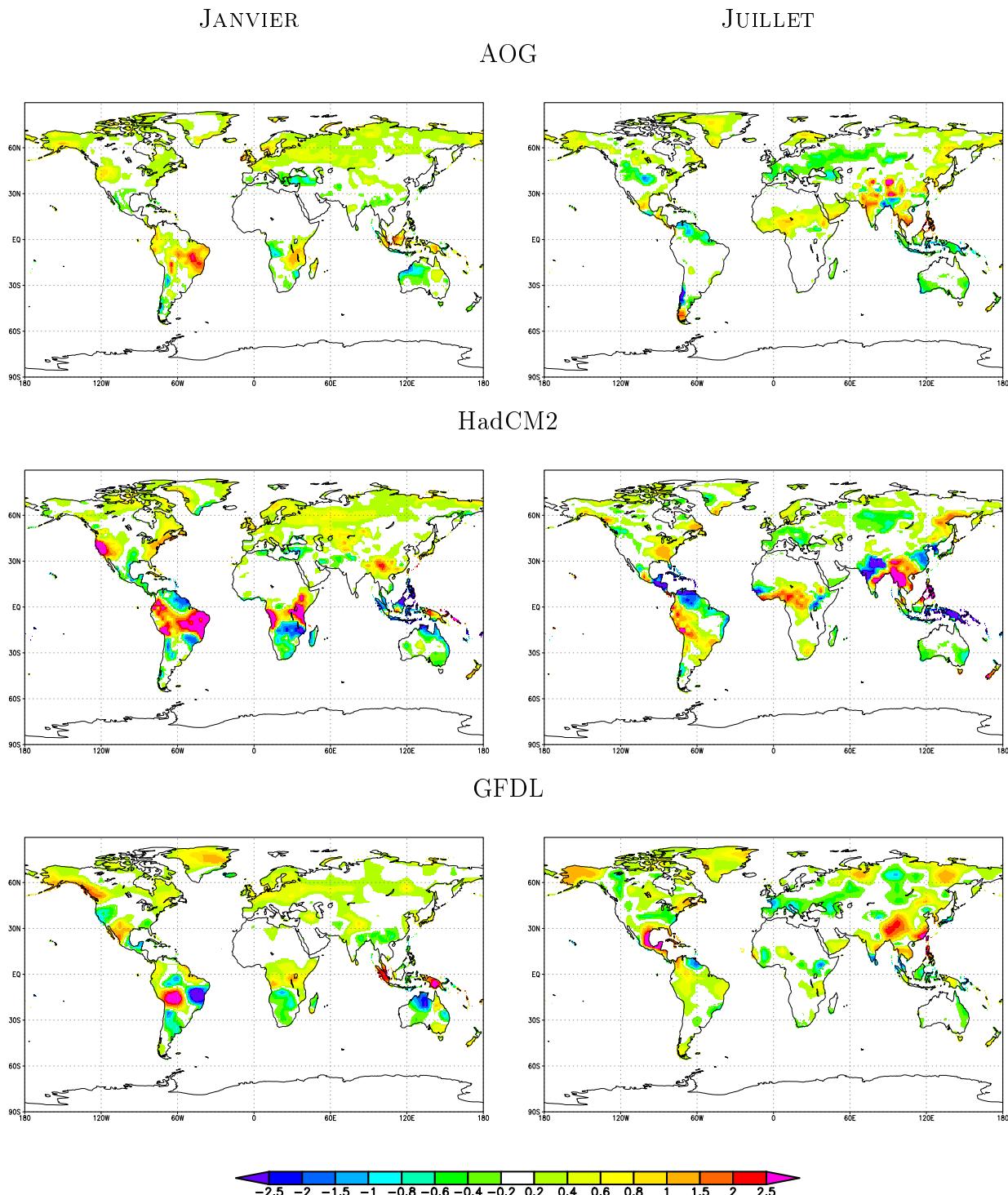


FIG. 2.7 - *Idem figure 2.6 pour les précipitations.*

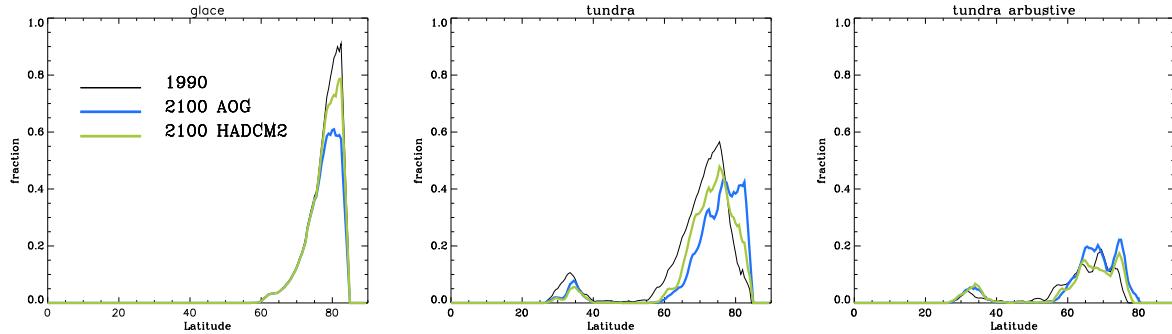


FIG. 2.8 - *Évolution de la surface occupée par la toundra, la toundra arbustive et la glace.*

Impact sur la végétation naturelle

Pour les hautes latitudes, on a vu précédemment que le développement de la végétation était limité par la température. Ce sont donc les changements de température qui vont avoir un impact sur cette région. La figure 2.8 montre que le réchauffement qui a lieu au cours du scénario se traduit par une diminution de l'aire des zones recouvertes toute l'année par de la glace (la courbe correspondant au modèle GFDL n'a pas été reproduite par souci de lisibilité mais elle est similaire à celle obtenue pour HadCM2). Cet effet est plus marqué avec le motif de AOG qui intensifie fortement le réchauffement aux hautes latitudes (diminution de 30% de l'aire de la glace avec AOG comparé à 10% avec le HadCM2). Consécutivement, la toundra s'étend beaucoup plus vers le nord en remplacement de la glace avec le motif de AOG.

Impact sur les cultures

Pour l'Inde, les modèles simulent un impact opposé sur les précipitations. Ceci se traduit logiquement dans IMAGE par un allongement de la saison de croissance avec les motifs de AOG et GFDL et une réduction avec HadCM2. La figure 2.9a montre les productivités des différents types de céréales sur l'Inde dans les trois simulations et pour la simulation de référence pour laquelle on n'introduit pas de changement climatique en température et en précipitations (SCC). On remarque que la production agricole sur l'Inde sous changement climatique est toujours inférieure ou égale à celle qu'il y aurait sans changement de température et de précipitations. Les productions de riz et de tubercules sont particulièrement dépendantes du motif utilisé. Cela indique que l'évolution des précipitations est un facteur important pour ces deux types de cultures. On retrouve les différences obtenues pour le riz sur l'Inde en moyenne globale car l'Inde en est le principal producteur. Ces résultats montrent que l'incertitude des projections climatiques en terme

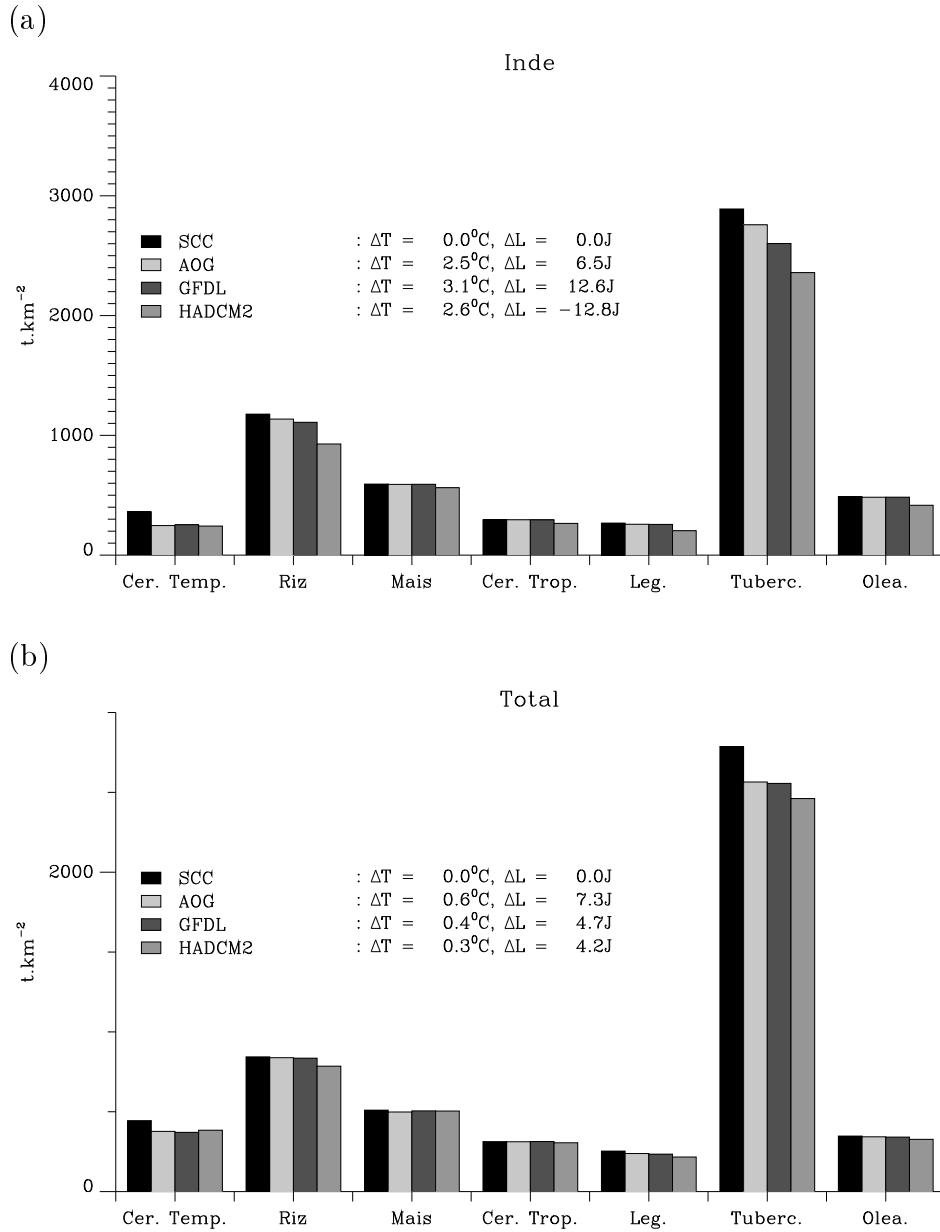


FIG. 2.9 - Productivité des terres cultivées (a) sur l'Inde et (b) en moyenne globale en différents types de céréales en 2100, pour une simulation de référence où l'on ne change pas le climat (SCC) et pour trois motifs de changement climatique : celui de AOG, celui du GFDL et celui de HadCM2. Les changements de durée de la saison de croissance ΔL et de la température moyenne durant cette saison ΔT sont indiqués pour chaque simulation.

de précipitations induit des incertitudes importantes sur les productions régionales des cultures en particulier dans les tropiques.

2.2.3 Changement de la sensibilité

Dans un deuxième temps, on utilise la sensibilité du MCG plutôt que celle du module climatique, l'équation 2.2 est alors remplacée par l'expression suivante :

$$T_y(m, x) = T_{1990}(m, x) + \frac{\Delta T_y^I}{\Delta T_{2100}^I} \times \Delta \bar{T}^G(m, x) \quad (2.7)$$

De même, pour les précipitations :

$$P_y(m, x) = P_{1990}(m, x) + \frac{\Delta T_y^I}{\Delta T_{2100}^I} \times \Delta \bar{P}^G(m, x) \quad (2.8)$$

Ici, le terme $\Delta \bar{T}^G(m, x)$ est calculé suivant la formulation 2.6, pour une simulation scénario cohérente avec le scénario utilisé pour faire la simulation IMAGE. Dans le cas de notre étude, nous disposons d'un scénario A2 réalisé avec le modèle AOG. Le terme $\Delta \bar{T}^G(m, x)$ représente alors le changement climatique obtenu dans le MCG en 2100. Avec cette expression, le changement climatique vu par IMAGE en fin de simulation est celui qui est simulé par le MCG. Par rapport à la simulation avec le motif du AOG réalisée précédemment, on réalise une homothétie pour obtenir un changement climatique en 2100 identique à celui simulé par AOG, comme schématisé à la figure 2.4 pour la simulation C.

Pour l'expérience de référence, avec le motif de AOG et la sensibilité moyenne $\frac{1}{\lambda} = 2.5^\circ$, on obtenait une augmentation de température de 3.7°C en 2100 pour le scénario A2, tandis que lorsque l'on utilise aussi la sensibilité du MCG, on obtient un réchauffement de 4.6°C (voir figure 2.11) en moyenne sur les continents. L'intensité du forçage climatique est ainsi augmenté de 25% pour les températures comme pour les précipitations.

La figure 2.10a montre que l'intensification du changement climatique induit, en moyenne globale, une légère augmentation de la productivité potentielle des différents types de cultures. Toutefois cette augmentation de la productivité potentielle n'est pas du tout uniforme suivant les régions et le type de culture considérés. Ainsi, pour les régions des plus hautes latitudes de l'hémisphère nord (Canada, Russie), le réchauffement et l'allongement de la durée de croissance résultante, induisent une forte augmentation de la productivité potentielle de tous les types de cultures (figure 2.10b). Pour les régions où la saison de croissance est raccourcie (Afrique du Sud, Indochine, Amérique centrale), on observe une réduction des productivités potentielles avec l'intensification du changement climatique. En Afrique du Sud (figure 2.10c), on remarque que la modification du climat

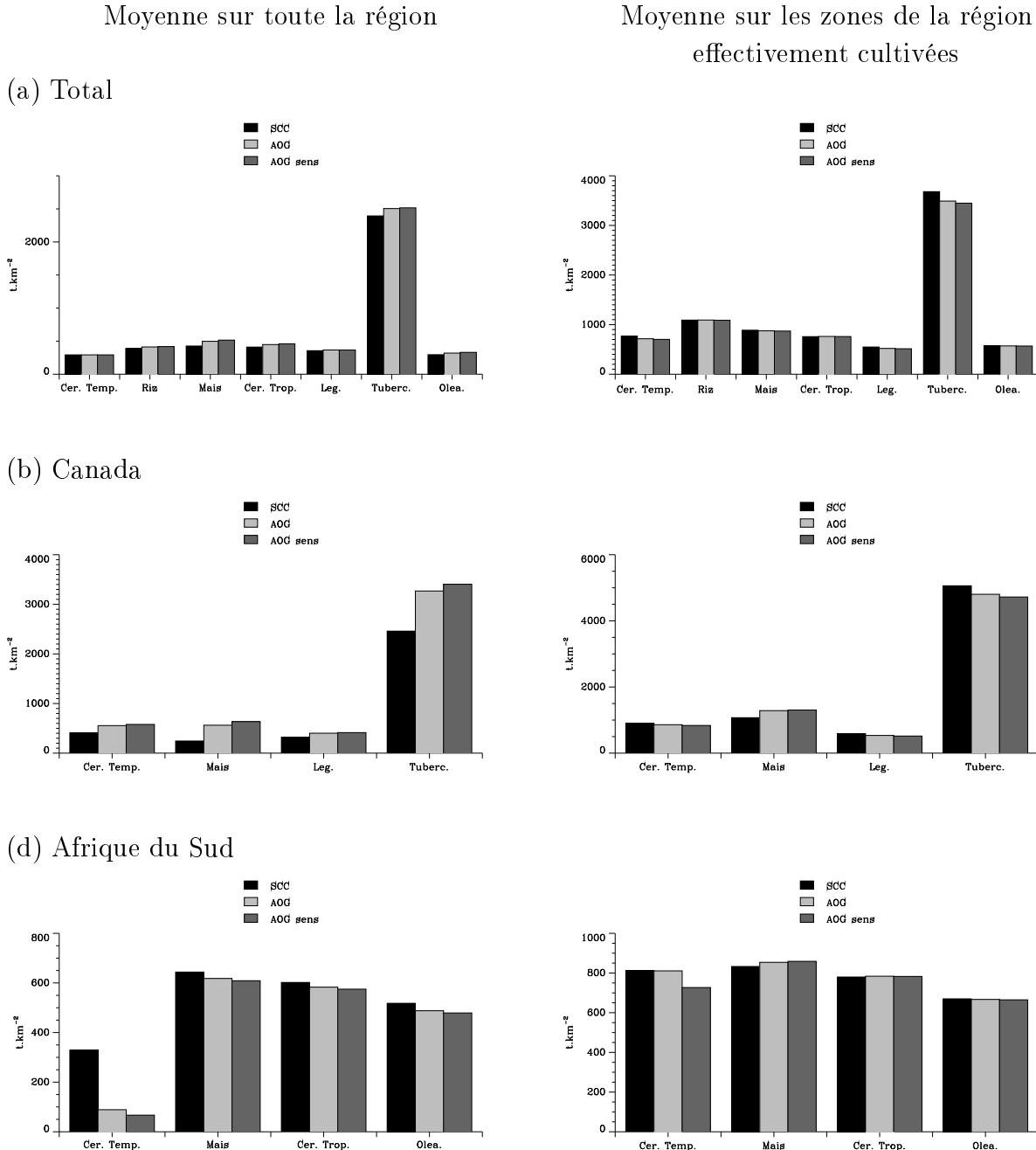


FIG. 2.10 - Productivité potentielle des cultures pour (a) l'ensemble des régions, (b) le Canada (c) l'Afrique du Sud en 2100, pour tous les points de la région (colonne de gauche), et pour les points qui ont été effectivement cultivés (colonne de droite). Pour chaque région, seules les cultures cultivées sur plus de 5% de la surface totale cultivée de la région ont été prises en compte.

a un effet plus marqué sur la productivité des céréales tempérées. En effet, ces cultures ont une température optimale de croissance assez faible (17°C), alors que la température moyenne de la saison de croissance sur cette région est de 18.5°C dans le cas sans changement climatique, et atteint 20.8°C avec la sensibilité de AOG. L'écart à la température optimale de croissance augmente donc avec le changement climatique et la productivité décroît alors assez rapidement. L'impact de la sensibilité n'est pas linéaire en raison de cette notion d'optimum climatique.

Ces diagnostics reflètent uniquement l'impact environnemental sur la production, et ne prennent pas en compte les contraintes économiques. La colonne de droite de la figure 2.10 donne le même diagnostic de productivité potentielle, mais moyenné uniquement sur les points de grille qui ont effectivement été utilisés pour cultiver chaque espèce respectivement. La différence avec le diagnostic précédent est donc qu'il y a eu un choix de parcelles réalisé, et que ce choix prend en compte des contraintes économiques (préférence à réutiliser une terre déjà cultivée, distance à un point d'eau, quantité de chaque espèce demandée, non possibilité d'utiliser une même terre pour plusieurs cultures, etc.).

En moyenne globale, ce diagnostic montre un faible impact de l'intensité du changement climatique sur la productivité. On observe plutôt une réduction des productivités avec un changement climatique croissant, ce qui semble contradictoire avec une productivité potentielle qui augmente. Ceci montre que l'allocation des cultures est un facteur important dans la productivité finale obtenue. Sur le Canada, le changement climatique est très favorable mais cela n'apparaît que pour le maïs une fois sélectionnés les points réellement cultivés. Deux raisons peuvent expliquer cet effet inattendu. D'une part, les cultures sont de préférence situées là où il y en avait déjà l'année précédente, ce qui peut limiter les possibilités de déplacer rapidement les cultures vers des zones devenues plus favorables. D'autre part, l'augmentation de productivité moyenne sur toute la région peut refléter essentiellement une augmentation des faibles productivités, et non une augmentation des productivités des zones les plus productives.

Cette analyse a montré que l'utilisation de la sensibilité du modèle AOG au changement de concentrations en GHGs dans le modèle IMAGE a accru l'amplitude du changement climatique de 25%. Cette augmentation d'amplitude a un effet assez faible sur les productivités des céréales, qui est plutôt négatif en moyenne globale. Toutefois, l'effet d'un tel changement climatique présente de fortes disparités régionales et dépend des cultures considérées. Cette étude montre que le système de carte de végétation dynamique est relativement complexe. Il fait intervenir de nombreux facteurs qui doivent être analysés en détail si l'on veut comprendre les changements de productivité obtenus.

2.2.4 Utilisation directe d'un scénario de AOG

Dans ce cas, l'étape de régionalisation est supprimée et les changements de température et de précipitation sont directement fournis par le MCG tout au long de l'intégration. Le changement de température global simulé par le module climatique simple d'IMAGE n'est plus pris en compte. Il n'y a alors pas de rétroaction possible entre le changement de concentration en GHGs simulé et le changement climatique utilisé. On analyse ici seulement l'impact de l'utilisation du climat du MCG dans IMAGE sans possibilité de rétroaction. Cette méthode pourra ensuite être utilisée pour le couplage dynamique entre les deux modèles. L'équation 2.2 se réécrit alors de la façon suivante :

$$T_y(m, x) = T_{1990}(m, x) + \Delta \bar{T}_y^G(m, x) \quad (2.9)$$

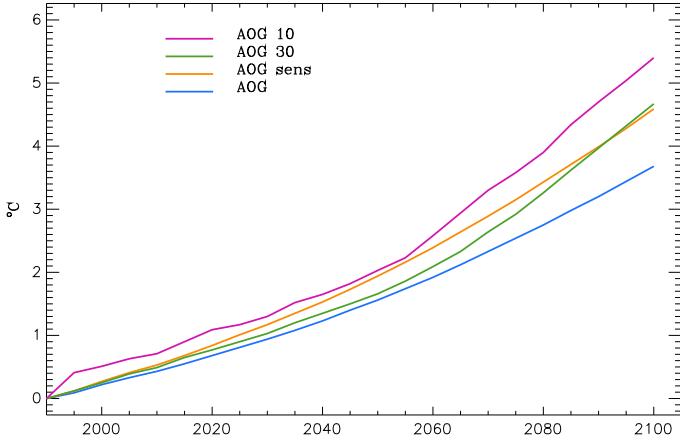
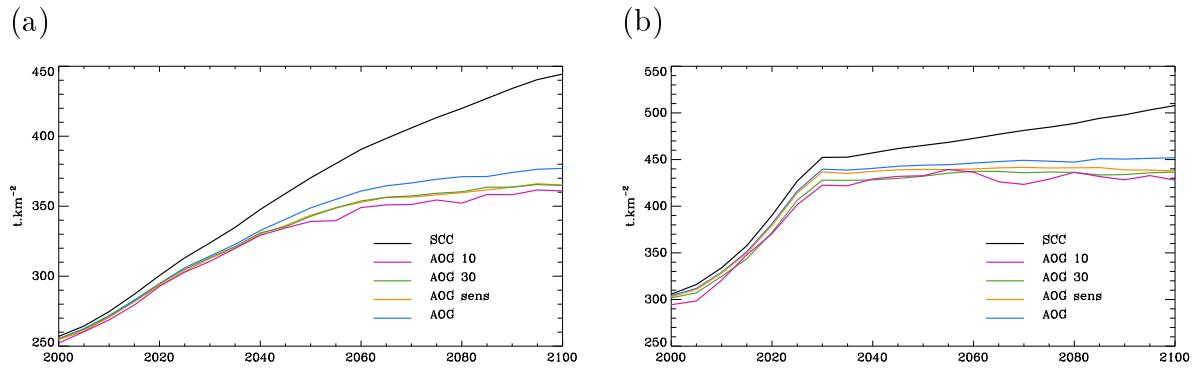
où

$$\Delta \bar{T}_y^G(m, x) = \bar{T}_{[(y-30)/(y-1)]}^{MCG}(m, x) - \bar{T}_{[1960/1989]}^{MCG}(m, x) \quad (2.10)$$

Les précipitations sont calculées suivant la même méthode et leur évolution devient indépendante de celle des températures. Par rapport aux expériences précédentes, le motif de changement climatique évolue au cours du scénario (comme représenté sur le schéma 2.4 pour l'expérience D).

Ainsi, le modèle est forcé par des anomalies résultant des moyennes glissantes sur un scénario déjà réalisé. Normalement, ces moyennes sont calculées sur des périodes de trente ans, périodes assez longues pour représenter un climat moyen pouvant être utilisé par le modèle BIOME et par le modèle agronomique (AEZ). Idéalement, cette moyenne devrait être calculée sur une plage centrée sur la période considérée. Comme on veut réaliser le même genre de simulation en mode couplé entre AOG et IMAGE, on doit utiliser les moyennes calculées sur les trente années précédant l'année de calcul de la carte de végétation. Il aurait été préférable de prendre une fenêtre centrée sur l'année traitée mais on ne peut connaître le climat futur au cours de la simulation. En calculant les anomalies sur les trente années précédentes, on introduit un certain déphasage dans le forçage climatique.

Afin de réduire ce déphasage, on a réalisé la même expérience mais avec des moyennes glissantes calculées sur 10 ans. L'inconvénient de prendre une durée aussi courte est d'introduire une variabilité plus basse fréquence que les modules d'IMAGE (et en particulier BIOME) ne savent pas traiter. L'étude de ? (?) a déjà montré que la simulation d'une carte de végétation par le modèle BIOME était très sensible au nombre d'années prises en compte dans le calcul du climat. En revanche, avec des moyennes calculées sur 10 ans, le déphasage est fortement réduit ce qui conduit à introduire une augmentation de température plus forte entre 1990 et 2100 de 0.8°C (voir figure 2.11).

FIG. 2.11 - *Taux d'évolution de la température moyennée sur les continents.*FIG. 2.12 - *Évolution de la productivité (a) des céréales tempérées en moyenne globale, et (b) sur l'Europe de l'Est.*

Lorsque l'on utilise directement les anomalies calculées par le modèle ARPEGE, la tendance au réchauffement est plus faible au début du XXI^{ème} siècle mais devient plus importante à partir de 2050. La simulation avec moyennes glissantes sur 10 ans introduit quelques variations décennales mais qui restent faibles par rapport à la tendance globale.

Impact sur les cultures

En moyenne globale, le changement du taux d'évolution du climat a un impact faible sur les productivités simulées (figure 2.12a). La simulation utilisant des moyennes sur 30 années donne des résultats similaires à la simulation utilisant uniquement la sensibilité de AOG. En utilisant des moyennes sur 10 ans, le changement climatique final est un

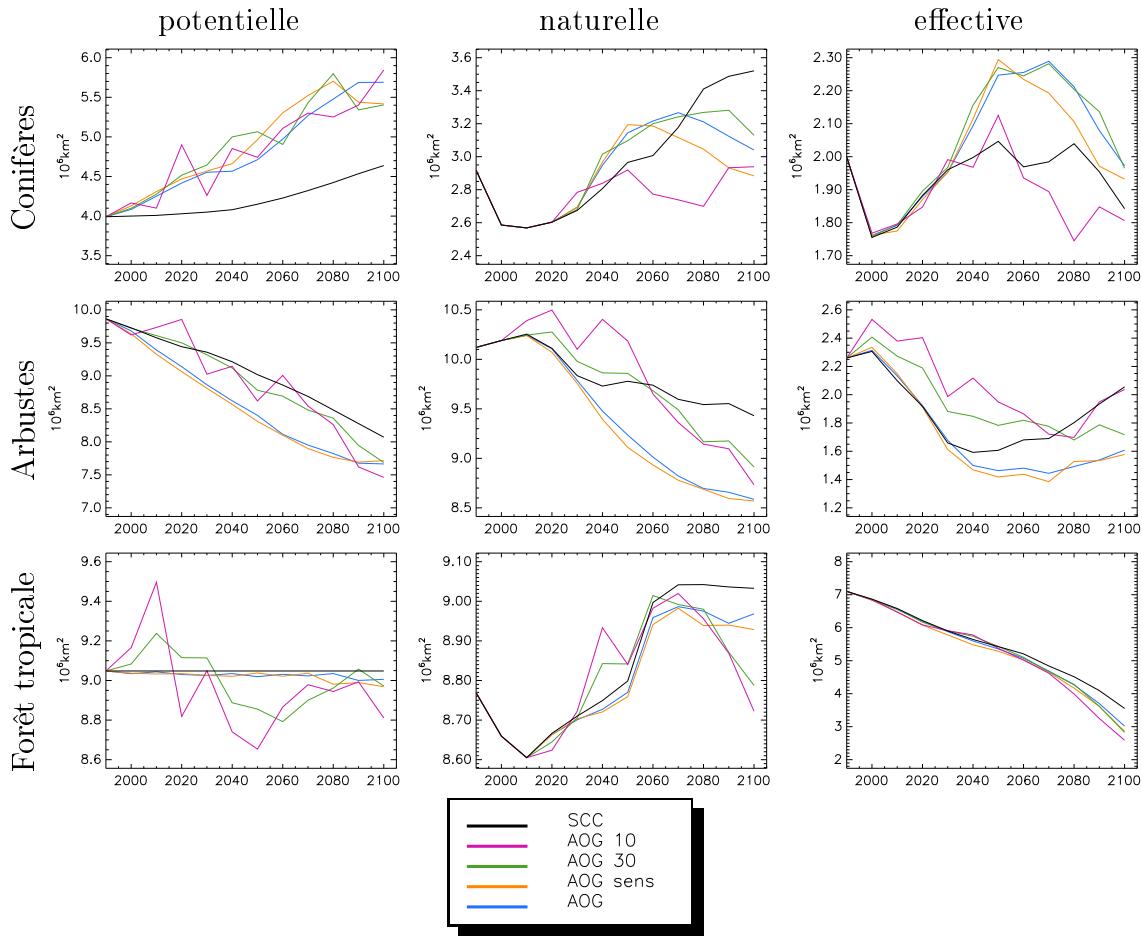


FIG. 2.13 - Évolution de la surface couverte par les forêts de conifères (en haut), par des arbustes (au milieu) et par les forêts tropicales (en bas) pour les cartes de végétation potentielle (colonne de gauche), naturelle (au centre) et réelle (à droite).

peu plus marqué ce qui induit la plus faible productivité des céréales tempérées en 2100 parmi toutes les expériences. Les résultats sont assez similaires lorsque l'on regarde les productivités par région. L'utilisation de moyennes glissantes sur 10 ans introduit une variabilité plus haute fréquence, mais l'amplitude des oscillations reste très faible par rapport à la valeur des productivités. La productivité des cultures est surtout dépendante de l'évolution des pratiques agricoles (qui est modélisée dans IMAGE par un facteur d'exploitation), plus que du changement climatique.

Impact sur la végétation naturelle

Pour la végétation naturelle, le changement climatique est pris en compte dans le modèle BIOME qui simule la carte de végétation potentielle. L'introduction d'une évolution

du motif de changement climatique a donc principalement un effet sur la végétation potentielle. La colonne de gauche de la figure 2.13 montre la superficie du globe couverte par la forêt de conifères, les arbustes et la forêt tropicale pour la végétation potentielle. La simulation SCC simule des changements de végétation uniquement dus au changement de la concentration en CO₂ en considérant que la température et les précipitations n'évoluent plus après 1995. On s'aperçoit que pour ces 3 types de végétation l'utilisation de moyennes sur 10 ans introduit une forte variabilité de l'évolution des aires respectives. Pour la forêt tropicale, les variations obtenues ont d'un ordre de grandeur nettement plus grand que la diminution de l'aire au cours du siècle pour les scénarios de référence.

Avec les moyennes calculées sur 30 ans, on obtient une variabilité plus faible, mais qui est toujours plus importante que pour les scénarios utilisant un motif constant. Ce diagnostic montre que l'utilisation d'un motif «variable» introduit une variabilité dans la carte de végétation potentielle qui n'était pas observée dans les simulations classiques réalisées avec IMAGE. Toutefois, la carte de végétation potentielle n'est qu'une étape dans le calcul de la carte de végétation réelle et elle n'est donc pas vouée à représenter une évolution réaliste de la végétation naturelle.

La colonne du milieu de la figure 2.13 montre le même diagnostic pour la carte de végétation naturelle. Cette carte est une adaptation de la carte de végétation potentielle prenant en compte la possibilité ou non des transitions proposées par les changements de la végétation potentielle. Malgré le lissage opéré par la prise en compte des durées de transitions, la variabilité de la simulation avec des moyennes sur 10 ans reste assez importante. Pour la forêt tropicale, cette expérience simule un «pic» en 2040 qui ne semble pas très réaliste. Pour les forêts de conifères, elle montre une évolution assez différente des autres expériences. Dans la simulation avec des moyennes sur 30 ans, la variabilité est plus fortement réduite et la simulation ressemble plus à la simulation avec motif fixe.

La colonne de droite montre ce même diagnostic pour la carte de végétation «réelle» simulée par IMAGE. On remarque tout d'abord que l'étendue de la forêt tropicale décroît de façon très similaire quelque soit le forçage climatique alors que la carte de végétation naturelle montrait plutôt une augmentation de son étendue. Ceci montre que les contraintes économiques qui pilotent la déforestation dominent l'évolution de ce biome. Dans ce cas, le forçage climatique a peu d'impact. Pour les deux autres biomes, la simulation avec moyennes sur 10 ans montre toujours une forte variabilité et l'évolution différente de l'étendue naturelle des conifères se retrouve pour l'étendue réelle. Compte-tenu du temps nécessaire à l'implantation d'une forêt de conifères, cette variabilité ne paraît pas très crédible.

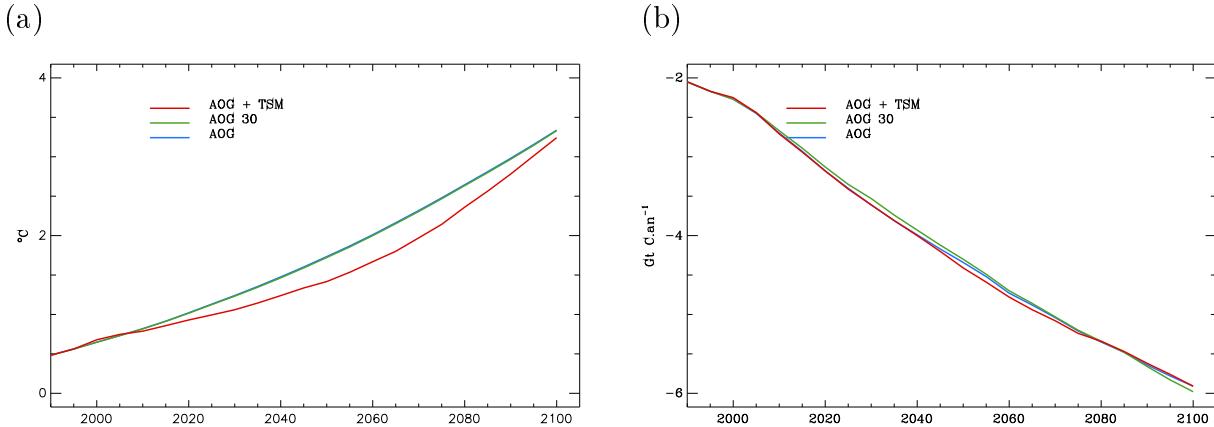


FIG. 2.14 - (a) Anomalies de température moyenne globale de l'océan et (b) flux de carbone de l'océan vers l'atmosphère.

2.2.5 Utilisation des TSMs de AOG

A l'étape précédente, le changement de température global calculé par le module climatique d'IMAGE n'est plus du tout utilisé pour évaluer les changements de végétation. En revanche, le module de carbone océanique utilise un facteur correctif en fonction de la température de surface de l'océan simulée par le modèle de climat. Il a donc aussi été testé de forcer le modèle de carbone océanique par le changement de température de surface de la mer simulé par le MCG. Ce changement de TSM doit être fourni tout au long de l'intégration du modèle donc de manière similaire à celui calculé sur les continents à l'étape précédente.

En utilisant le changement de température océanique simulé par OPA, on obtient à peu près la même température en 2100 que lorsque l'on utilisait le module d'IMAGE (voir figure 2.14a). En revanche, la différence des évolutions atmosphériques se retrouve dans les tendances océaniques. OPA simule un réchauffement modéré au début du XXI^{ème} siècle et plus accentué après 2060. Cette différence de l'évolution de la température ne semble pas avoir d'impact sur le flux de carbone dans l'océan (figure 2.14b). Il semble donc que le facteur correctif en température ait peu d'impact sur le calcul du flux de carbone.

Cette modification sera conservée pour la réalisation d'un scénario couplé entre AOG et IMAGE par souci de cohérence et pour s'affranchir complètement du module climatique d'IMAGE, mais elle semble avoir peu d'impact sur la simulation IMAGE.



FIG. 2.15 - Moyenne zonale des anomalies de nébulosité, évaporation potentielle et évaporation réelle en 2100 entre la simulation introduisant les changements de nébulosité et la simulation de référence.

2.2.6 Modification de la nébulosité

Par défaut, le modèle IMAGE considère que la nébulosité n'est pas modifiée lors d'une simulation du changement climatique sur le XXI^{ème} siècle. Or, la nébulosité est un des paramètres importants dans le calcul de l'évaporation potentielle (cf. Annexe A). Il a donc été testé d'introduire les changements de nébulosité simulés par AOG dans une simulation IMAGE. Comme pour les températures, on introduit les changements de nébulosité par des anomalies moyennes calculées tout les 5 ans sur des périodes glissantes de 30 ans (cf. section 2.2.4).

Au cours du XXI^{ème} siècle, le modèle AOG simule une réduction de la nébulosité sur presque tout le globe exceptées quelques zones proches de l'équateur et près des pôles. La réduction de nébulosité est la plus forte entre 30°N et 50°N et entre l'équateur et 45°S (figure 2.15). En réponse à ce forçage, IMAGE simule une augmentation de l'évaporation potentielle qui suit la même répartition zonale. On peut cependant remarquer que la forte augmentation de nébulosité simulée au-delà de 60°N n'entraîne qu'une faible réduction de l'évaporation potentielle.

L'augmentation de l'évaporation potentielle entre 50°S et 60°N se traduit par une augmentation de l'évaporation réelle. Cette augmentation est faible (inférieure à 0.03mm.j^{-1}). A l'équateur, l'évaporation réelle augmente autant que l'évaporation potentielle (dans cette région, la végétation évapore au taux potentiel). Cette augmentation d'évaporation réelle est du même ordre de grandeur que le changement d'évaporation réelle entre 2100 et 2000 pour la simulation de référence, tandis qu'aux autres latitudes elle est négligeable.



FIG. 2.16 - *Évolution de l'évaporation réelle en moyenne globale sur les continents calculée par IMAGE au cours des simulations AOG + TSM et AOG + Neb.*

A l'équateur, l'impact du changement de nébulosité est donc du même ordre de grandeur que l'impact des changements de température et de précipitation réunis.

Lors de la simulation AOG + TSM, l'évaporation moyenne globale sur les continents augmente ainsi de 0.08mm.j^{-1} de 2000 à 2100, tandis qu'elle augmente de plus de 0.1mm.j^{-1} pour la simulation AOG + Neb (figure 2.16). La réduction moyenne de la nébulosité intensifie ainsi la réduction de l'évaporation de 25% en moyenne globale, l'impact étant principalement localisé dans les tropiques.

2.3 Sensibilité d'IMAGE au forçage climatique

Cette section présente les simulations décrites précédemment en tant qu'un ensemble de simulations de sensibilité d'IMAGE au forçage climatique. Quelques diagnostics globaux et représentatifs de l'évolution de l'utilisation des terres sont exposés. La sensibilité d'IMAGE au signal de changement climatique (précipitations, température et nébulosité) est ainsi mise en évidence. Pour tous les diagnostics, une simulation de référence, non encore présentée, est ajoutée :

- ▶ No CO₂ (tireté noir), pour laquelle la végétation ne voit ni le changement climatique, ni l'augmentation de concentration en CO₂ à partir de 1995.

La simulation AOG + TSM est tracée en rouge comme représentative du couplage à sens unique entre AOG et IMAGE, la simulation SCC pour laquelle la végétation ne subit pas le changement de climat mais uniquement l'augmentation de concentration en CO₂ est un trait plein noir, et toutes les autres simulations référencées dans le tableau 2.1 sont tracées en gris.

2.3.1 Évolution de la couverture de végétation

Cartes de végétation

Pour la simulation AOG + TSM, la végétation potentielle change sur une grande partie des surfaces continentales (figure 2.17). Aux tropiques, les changements sont similaires à ceux obtenus pour la simulation SCC, ce qui indique que ces changements sont plutôt dus au changement de concentration en CO₂. Cela reflète l'effet fertilisation par le CO₂ et l'augmentation de l'efficience de l'utilisation de l'eau, pris en compte dans IMAGE. Au contraire, aux moyennes et hautes latitudes, la végétation potentielle change beaucoup plus dans la simulation AOG + TSM. Dans ces régions, il y a un fort décalage des zones de végétation en équilibre avec le climat. En particulier, les différents types de forêt se décalent nettement vers le pôle, en raison de l'augmentation de la température.

La carte de végétation naturelle est moins modifiée (figure 2.18). En particulier aux moyennes latitudes, les transitions d'un type de forêt à l'autre nécessitent au moins 50 ans ; les possibilités de changement sont ainsi réduites. On observe toutefois des changements nettement plus importants dans la simulation AOG + TSM que dans celle qui ne prend pas en compte le changement de climat.

Les changements de la végétation réelle (figure 2.19) montrent bien les changements de végétation naturelle, mais ils ne sont visibles que là où les cultures ne se sont pas étendues. D'autre part, les différences entre les deux simulations sont moins importantes. L'extension des terres cultivées est peu modifiée par le changement de climat.

Évolution de la distribution

? (?) estime que la proportion des surfaces continentales soumises à l'influence de l'homme est de 40% à 50% à la fin du XX^{ème} siècle. Ce type d'estimation est difficile à réaliser et est quelque peu subjective. A quel point un écosystème est-il resté vierge de toute influence humaine ? Il existe certainement peu de régions où l'on soit sûr que l'homme n'a pas eu le moindre impact. D'autre part, il est difficile de déterminer quelle serait la végétation sans l'intervention humaine. L'estimation de Vitousek prend en compte les zones où l'homme a manifestement modifié les écosystèmes pour son utilisation (cultures, exploitation de bois,...). La simulation IMAGE pour le XX^{ème} siècle est plutôt cohérente avec cette estimation : en 2000, plus de 39% des terres sont utilisées (figure 2.20a). Ceci reflète bien l'importance de la prise en compte de l'utilisation des terres pour la détermination de la couverture végétale sur le globe. Au cours du scénario A2, IMAGE simule une augmentation de la proportion des terres utilisées pour les cultures et la production de bois. En 2100, la proportion dépasse les 50% et atteint même 55% pour certains scénarios.

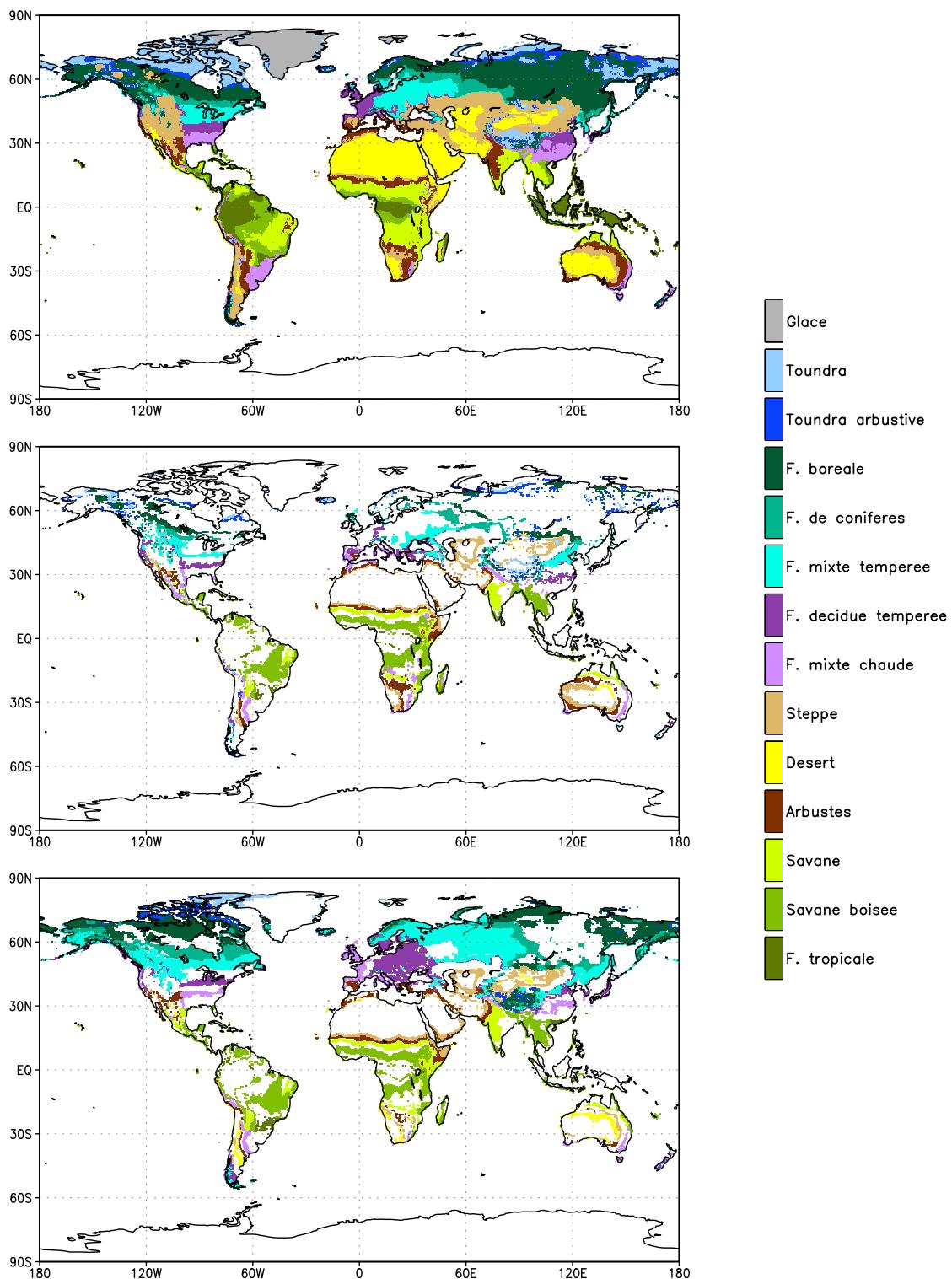
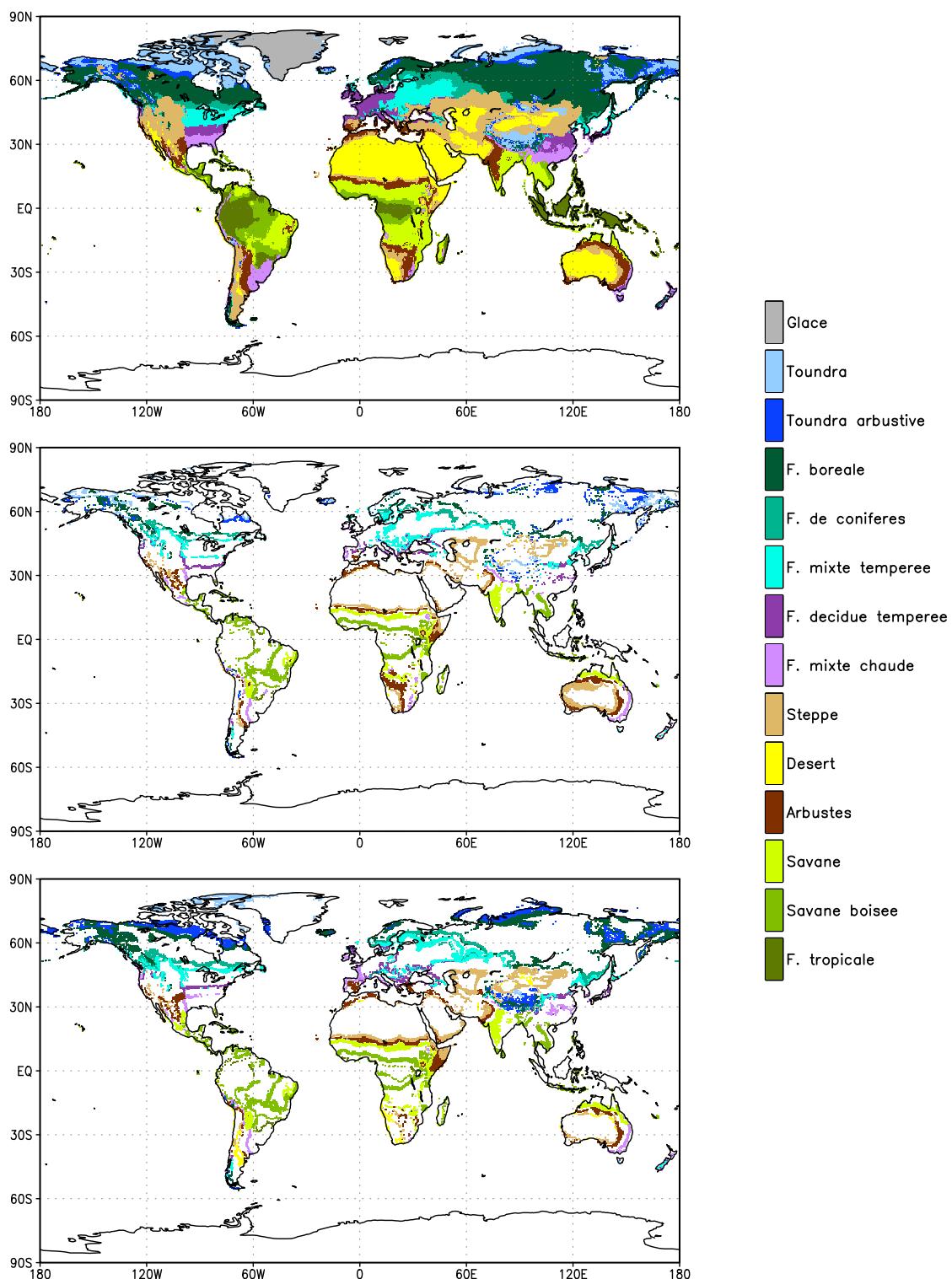


FIG. 2.17 - Carte de végétation potentielle en 1970 (en haut), en 2100 pour la simulation SCC (seuls les points pour lesquels la végétation a changé par rapport à 1970 sont indiqués) et en 2100 pour la simulation AOG + TSM.

FIG. 2.18 - *Idem 2.17 pour la végétation naturelle.*

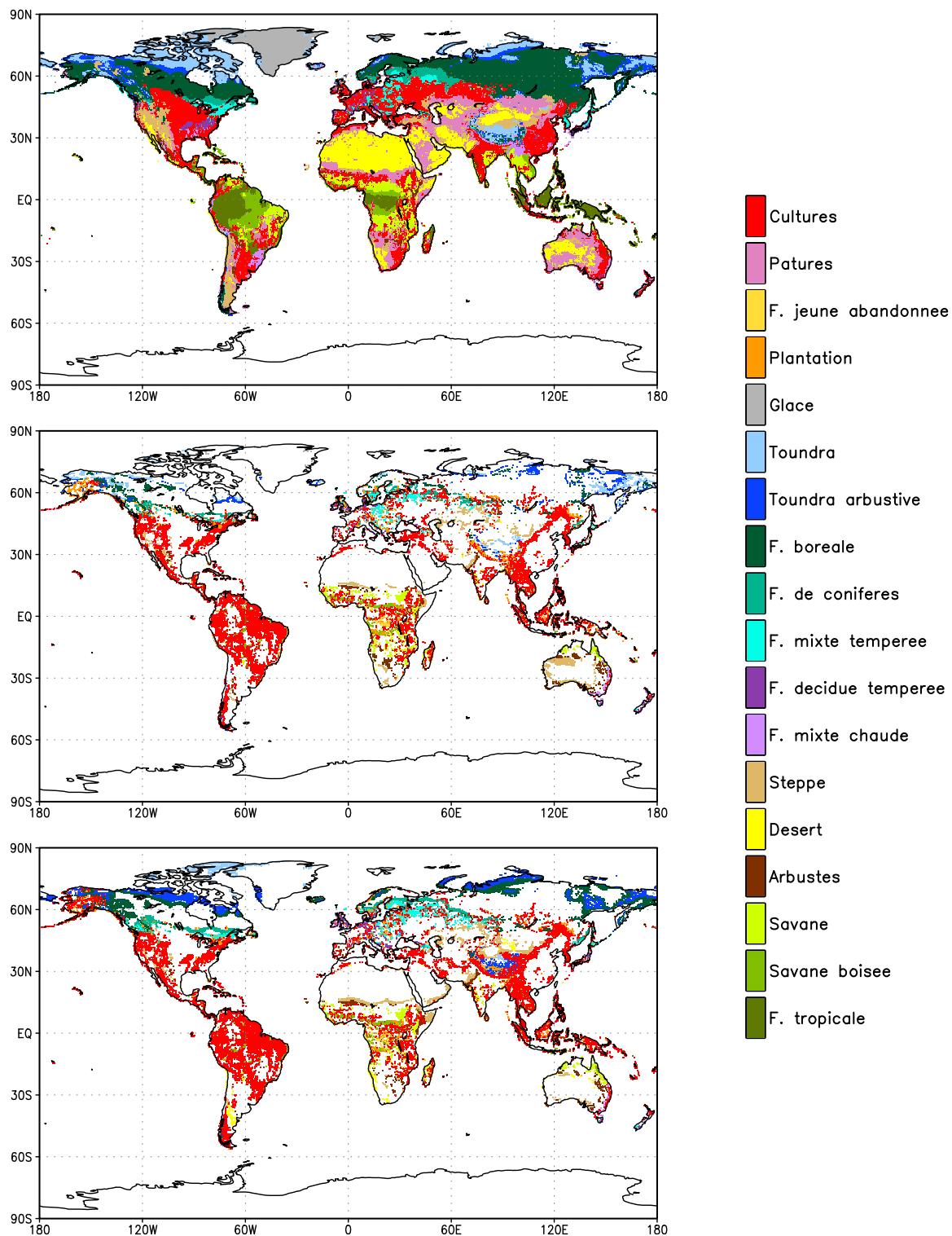


FIG. 2.19 - *Idem 2.17 pour la végétation réelle.*

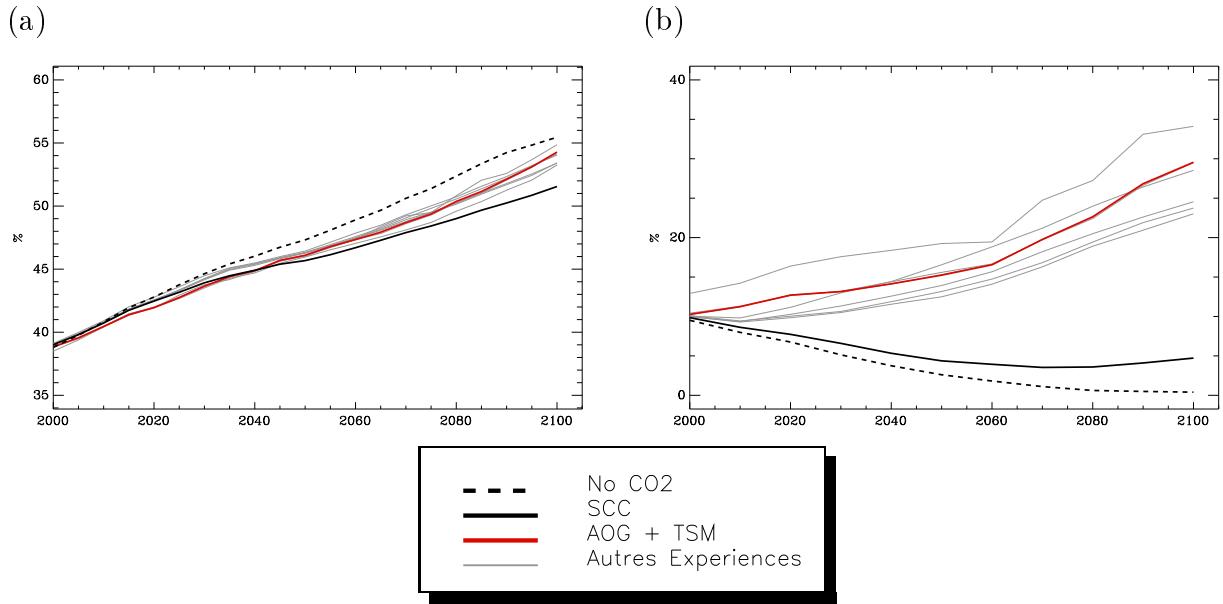


FIG. 2.20 - *Évolution de la proportion (a) des terres cultivées ou exploitées pour le bois qui correspond à la proportion des terres utilisées par l'homme et (b) de la végétation naturelle non en équilibre avec le climat (i.e. végétation naturelle différente de la végétation potentielle).*

Pour la végétation naturelle, IMAGE estime que seules 10% des surfaces sont recouvertes par une végétation non en équilibre avec le climat en 2000. Ceci indique que la prise en compte de la végétation dite naturelle au lieu de potentielle a peu d'impact au XX^{ème} siècle. Au cours du scénario, la proportion de la végétation non en équilibre avec le climat augmente avec les changements de température et précipitations. En 2100, de 25% à 35% de la végétation naturelle n'est plus en équilibre avec le climat.

L'utilisation des sols par l'homme ainsi que le changement de climat ont un impact important sur la couverture végétale. En 2100, il ne reste que 35% des surfaces continentales couvertes par de la végétation naturelle en équilibre avec le climat.

Comme suggéré par les cartes de végétation, on remarque que pour les terres utilisées, la prise en compte du changement climatique dans les simulations IMAGE a un impact faible devant la pression anthropique. Les simulations qui ne prennent pas en compte le changement de climat simulent une évolution des surfaces cultivées du même ordre de grandeur. En revanche pour la végétation naturelle, le changement climatique est primordial et les projections dépendent plus fortement du changement climatique utilisé. Pour les simulations de référence qui ne prennent pas en compte le changement climatique, la végétation n'est pas en équilibre avec le climat en 2000 car elle a subi les changements de

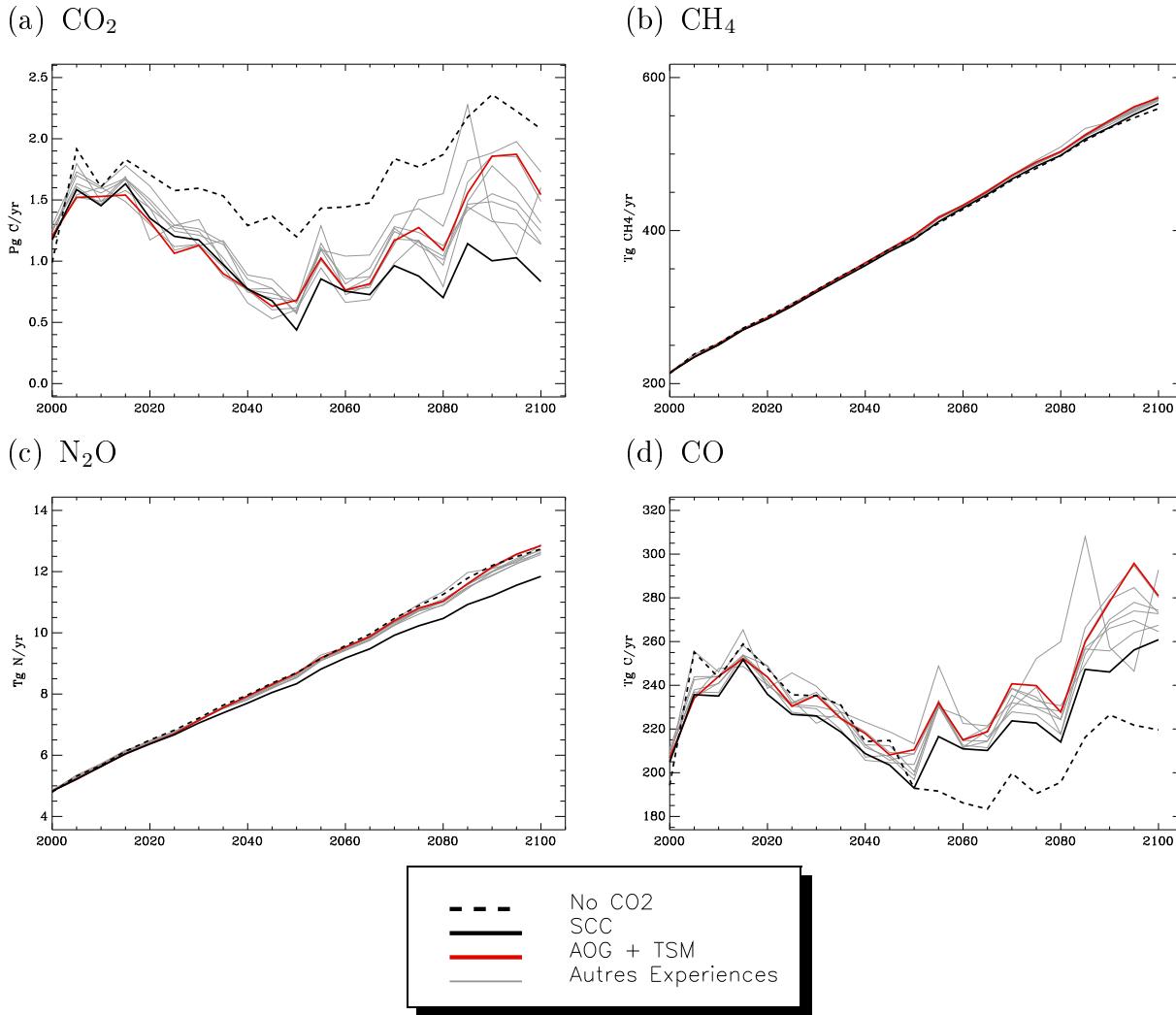
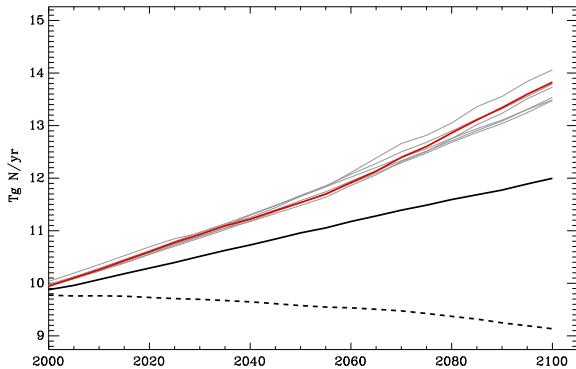
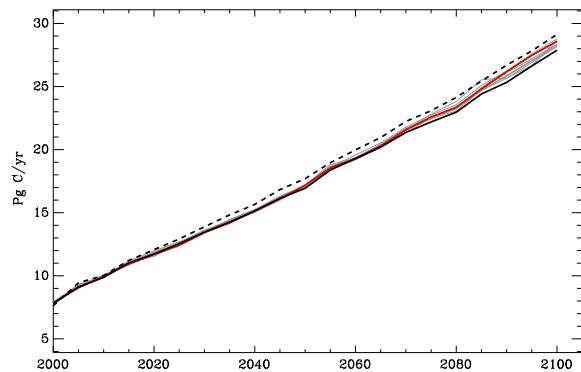
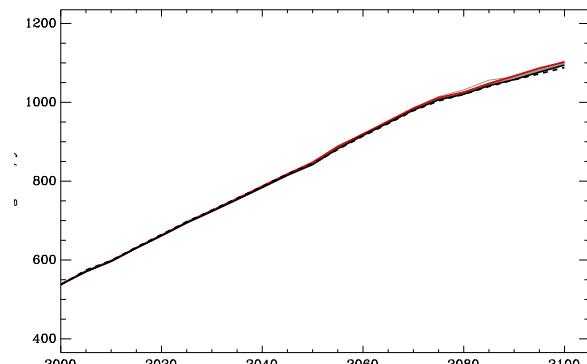
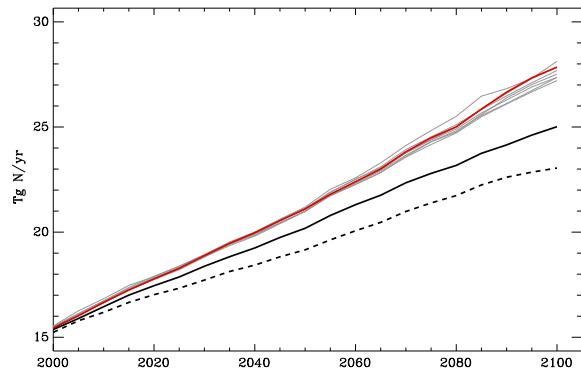


FIG. 2.21 - Émissions dues à l'utilisation des sols.

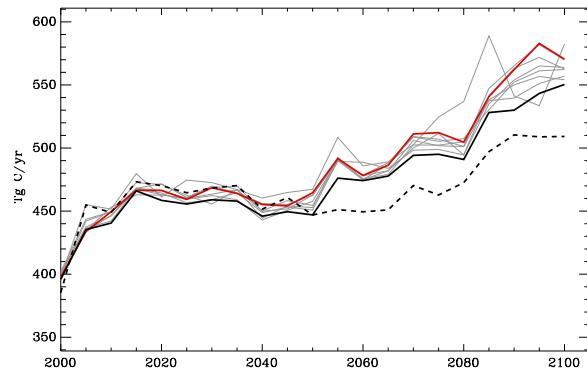
climat du XX^{ème} siècle, elle atteint ensuite progressivement l'équilibre au XXI^{ème} siècle au cours duquel elle ne «voit» plus le changement climatique.

2.3.2 Évolution des émissions

Le modèle IMAGE simule les émissions de GHGs et de précurseurs de l'ozone (voir table 1.2). La figure 2.21 montre l'évolution des émissions de CO_2 , CH_4 , N_2O et CO par l'utilisation des sols. Pour le méthane, toutes les simulations avec ou sans prise en compte du changement climatique montrent une évolution similaire. Cela reflète que les principales sources d'émissions du méthane (quantité de bétail, décharges, eaux usées)

FIG. 2.22 - *Émissions naturelles de N₂O.*(a) CO₂(b) CH₄(c) N₂O

(d) CO



— - -	No CO ₂
— — —	SCC
— — —	AOG + TSM
— — —	Autres Experiences

FIG. 2.23 - *Émissions totales*

sont plus dépendantes de la pression anthropique définie par le scénario économique que du changement de climat.

Pour l'oxyde nitreux, les émissions sont elles aussi peu dépendantes du forçage climatique utilisé. En revanche, la simulation sans changement climatique simule des émissions par l'utilisation des sols réduites de 10%. Cette différence est due à une moindre utilisation de fertilisants si le changement climatique n'est pas pris en compte. En revanche, dans le cas où la végétation ne voit pas non plus le changement de CO₂ (No CO₂), l'effet de fertilisation par le CO₂ est supprimé, les cultures nécessitent alors une fertilisation artificielle plus intense. Pour cette espèce, l'impact du changement de climat et de CO₂ se compensent donc.

Pour le dioxyde et le monoxyde de carbone, les émissions produites par l'utilisation des sols sont plus variables au cours de la simulation. On observe un minimum d'émissions vers 2050. Les émissions sont aussi plus dépendantes du forçage climatique utilisé. Ces deux composants sont essentiellement produits par la combustion de la biomasse lors de déforestations ou de feux de savane, phénomènes contrôlés par l'évolution de la végétation et la production de biomasse, donc dépendants du climat.

Les émissions naturelles d'oxyde nitreux (figure 2.22) augmentent au cours du scénario et cette augmentation est doublée lorsque le changement climatique est pris en compte. En revanche, le taux d'émission dépend peu du forçage climatique utilisé. Dans le cas où ni le changement de concentration en CO₂ ni le climat ne sont pris en compte, on a au contraire une diminution des émissions d'oxyde nitreux. Pour les trois autres espèces, les émissions naturelles sont constantes au cours du scénario.

Le bilan total des émissions montre que les émissions de dioxyde de carbone et de méthane sont surtout contrôlées par le scénario économique et que le forçage climatique a peu d'impact sur le total des émissions. Pour le dioxyde de carbone, les émissions par l'utilisation des sols représentent moins de 5% du total en fin de XXI^{ème} siècle. Pour l'oxyde nitreux, les sources d'émissions sont essentiellement naturelles et dues à l'utilisation des sols. Il en résulte un impact assez important du changement de climat sur les émissions totales. En revanche, le type de forçage climatique employé a un impact limité.

2.4 Synthèse

Cette étude a permis de caractériser la sensibilité d'IMAGE au forçage climatique utilisé. Les différentes simulations ont montré des différences surtout à l'échelle régionale. Deux aspects importants du changement climatique sont identifiés. D'une part, l'intensité du réchauffement aux hautes latitudes pilote les zones d'établissement de la végétation

boréale et de la glace. D'autre part, l'évolution de la végétation tropicale, y compris les cultures, est fortement dépendante de l'évolution des précipitations. La forte incertitude qui existe sur ce paramètre rend les résultats des modèles de végétation peu robustes. Seule une utilisation de simulations climatiques de différents MCGs peut permettre d'évaluer l'incertitude liée à l'évolution des précipitations.

L'analyse des différentes simulations a montré que la sensibilité au forçage climatique n'est pas linéaire et peu parfois être assez complexe. En particulier, la prise en compte de facteurs anthropiques limite les possibilités d'adaptation de la végétation. Ainsi, le choix d'utilisation des parcelles ne suit pas uniquement un critère de productivité.

En revanche, on note peu d'impact du forçage climatique sur les résultats en moyenne globale. Les taux d'émissions sont peu différents d'une simulation à l'autre. A l'échelle globale, les résultats dépendent principalement du scénario économique considéré et le changement climatique n'a qu'un effet secondaire.

Pour prendre en compte un changement climatique évolutif, l'utilisation de moyennes glissantes sur 30 ans semble être plus cohérente avec la formulation des modèles BIOME et AEZ. Pour réduire le problème de déphasage du changement climatique utilisé, on peut envisager d'extrapoler le changement climatique simulé par le MCG. La nécessité d'utiliser des moyennes sur de longues périodes est une limitation importante d'IMAGE. La prise en compte de la variabilité climatique, et notamment des événements extrêmes, paraît un enjeu plus primordial pour bien simuler l'évolution de la végétation. En effet, quelques années de sécheresse pourraient suffire à modifier la couverture végétale dans certaines régions. Cet aspect serait un axe de recherche intéressant pour améliorer le modèle d'environnement d'IMAGE.

Par ailleurs, l'inclusion de l'évolution de la nébulosité a montré son intérêt pour les régions tropicales. Cet effet pourra être pris en compte pour des simulations couplées AOG/IMAGE afin de permettre une meilleure interaction entre le changement climatique et l'évolution de la végétation en régions tropicales. Toutefois, cet effet ne sera pas pris en compte dans la première simulation couplée, afin de faire un premier essai en limitant le nombre de rétroactions prises en compte.

On retiendra de cette étude que l'utilisation directe d'une simulation de MCG dans IMAGE a donné des résultats assez comparables à l'utilisation du module de climat simplifié d'IMAGE. Les surfaces de végétation naturelle et de cultures ont une évolution semblable et les émissions totales en GHGs sont peu modifiées. Ces résultats permettent d'envisager de réaliser un couplage complet d'IMAGE avec AOG.

En couplant les deux modèles, IMAGE utilise un climat plus réaliste avec possibilité de rétroaction locale par rapport au changement de végétation. D'autre part, le MCG prend en compte une carte de végétation évolutive suivant la pression anthropique. Cela

semble un aspect particulièrement important pour des simulations de MCG puisque plus de 25% des surfaces continentales sont modifiées au cours du XXI^{ème} siècle dans IMAGE. Le MCG peut aussi utiliser le scénario d'émission en GHGs produit par IMAGE. Le scénario d'émission n'étant pas très sensible au changement climatique utilisé, il risque peu d'être modifié lors d'une simulation couplée entre les deux modèles.

Chapitre 3

Changement de végétation réaliste dans ARPEGE-Climat

3.1 Historique de la modélisation des interactions végétation-climat

3.1.1 Études pionnières

Les études

Les travaux de ? (?) sont généralement cités comme la première étude ayant postulé une rétroaction entre le couvert végétal et le climat. Charney avait proposé un mécanisme de rétroaction positive entre les changements de végétation et la sécheresse sur le Sahel. Il montre qu'une augmentation de l'albédo sur le Sahel (correspondant à une réduction du couvert végétal) entraîne une subsidence et un assèchement de la région, décalant l'ITCZ vers le sud. La diminution du couvert végétal favorise ainsi l'aridité du climat. ? (?) présente plusieurs autres études (?; ?; ?) qui ont étudié l'impact de changements régionaux d'albédo sur le climat dans des modèles de circulation générale. Toutes ses études mettent en évidence que le changement d'albédo provoque aussi une modification de l'évaporation du sol. La chaîne de rétroactions proposée par ? (?) est ainsi complexifiée. Ils montrent que les changements d'albédo induisent des modifications du transport d'humidité mais ces modifications sont variables suivant la région qui subit le changement d'albédo, et suivant le transport d'humidité initial.

Parallèlement à ces travaux sur l'influence des changements d'albédo, d'autres études se sont intéressées à l'influence de l'humidité du sol sur le climat. Ainsi, ? (?) montrent

que supprimer l'évaporation sur les continents réduit très fortement les précipitations sur les continents sauf dans quelques régions (Asie du Sud-est, Sahel, Amazonie, Est de l'Amérique du nord) pour lesquelles le transport d'humidité continue d'alimenter les précipitations. Ils mettent ainsi en évidence l'importance du recyclage de l'eau sur les continents : les précipitations sont en grande partie dues à l'évaporation sur les continents. D'autre part, réduire l'évaporation entraîne une forte augmentation de la température en surface par réduction de l'effet de refroidissement normalement dû au flux de chaleur latente, mais aussi par augmentation de l'énergie solaire reçue en surface du fait de la réduction de la nébulosité. ? (?) ont aussi montré que l'humidité du sol a un impact important sur la variabilité du climat. L'humidité du sol contrôle la répartition des flux d'énergie en surface et ainsi la température en surface. Comme l'humidité du sol varie lentement relativement au forçage atmosphérique, elle a un effet stabilisateur sur les flux d'énergie et la température.

L'influence de la rugosité du sol a également été mise en évidence par les travaux de ? (?) ; ? (?) ; ? (?) . ? (?) ont montré qu'en réduisant la rugosité du sol sur le Sahara, l'ITCZ était déplacée vers le sud et que les précipitations sur le désert étaient réduites. ? (?) soulignent que la rugosité de la surface modifie fortement le transport d'humidité dans la couche limite atmosphérique et a ainsi un impact important sur les précipitations.

Le modèle bucket

Toutes ces études ont montré l'importance d'une bonne spécification des conditions de surface pour simuler le climat, et le couplage fort qui existe entre les surfaces continentales et l'atmosphère. Ces études ont été réalisées dans des modèles de circulation générale globaux. Les changements des propriétés de surface effectués étaient assez étendus et ils n'incluaient pas de modélisation explicite de la végétation en surface. A cette époque, les modèles de circulation générale simulaient les échanges en surface de manière simple (voir schéma 3.1a). Tous les modèles de surface sont basés sur le bilan d'énergie qui est formulé par les deux équations suivantes :

- Le bilan radiatif :

$$R_n = S(1 - \alpha) + L_w - \epsilon\sigma T_s^4 \quad (3.1)$$

où R_n est le rayonnement net absorbé en surface, S est l'insolation, α l'albédo de surface, L_w le flux infrarouge descendant, ϵ l'émissivité de la surface, σ la constante de Stefan-Boltzmann et T_s la température de surface. L'insolation S est calculée en fonction de la latitude, de la longitude, de l'heure de la journée et de la nébulosité (simulée ou prescrite). L_w est fonction de la température, du profil vertical d'humidité et de la nébulosité.

- L'énergie ainsi absorbée sous forme radiative est répartie en trois flux de chaleur :

$$R_n = G + H + LE \quad (3.2)$$

G est le flux de chaleur dans le sol, H le flux de chaleur sensible, E l'évaporation et L la chaleur latente de vaporisation.

La conception d'un modèle de surface consiste alors à proposer une formulation pour chaque élément de ces deux équations. Dans les premiers modèles, G était souvent calculé suivant la méthode de ? (?) dite «force-restore» (elle simule la diffusion de chaleur dans le sol mais ne prend pas en compte les éventuels changement de phase de l'eau dans le sol). Le flux de chaleur sensible est calculé suivant la formule :

$$H = \rho c_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (3.3)$$

où T_a est la température au premier niveau du modèle, r_a est la résistance aérodynamique entre la surface et la premier niveau du modèle, ρ est la densité de l'air et c_p la chaleur massique. L'évaporation est calculée suivant l'équation :

$$E = \beta \rho \frac{q_{sat}(T_s) - q(T_a)}{r_a} \quad (3.4)$$

où $q_{sat}(T_s)$ est l'humidité spécifique à saturation à la température T_s , et $q(T_a)$ est l'humidité spécifique au premier niveau du modèle. Le facteur β permet de prendre en compte la disponibilité en eau du sol (si β vaut 1, le sol évapore comme une surface saturée).

L'humidité du sol est calculée suivant l'approche «bucket» proposée par ? (?). Le réservoir en eau se remplit grâce aux précipitations, quand il est saturé, l'excès de précipitations produit du ruissellement. On note w le contenu en eau du réservoir et w_{sat} le contenu du réservoir à saturation (contenu maximal). ? (?) propose la formulation suivante pour le calcul de β :

$$\begin{aligned} & \text{si } w \geq w_{seuil} \quad \beta = 1 \\ & \text{si } w < w_{seuil} \quad \beta = \frac{w}{w_{seuil}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

la valeur w_{seuil} est choisie empiriquement. ? (?) propose de prendre simplement $w_{seuil} = 0.75w_{sat}$.

Les études présentées précédemment utilisaient toutes une approche de type «bucket» telle que celle proposée par ? (?), la fonction β prenant des formes parfois différentes. Dans ces modèles, la capacité du réservoir en eau w_{sat} était en général uniforme sur les continents. Ces modèles ne modélisaient alors pas du tout l'influence de la végétation sur les flux. Toutefois, les expériences de sensibilité menées montraient l'importance de bien modéliser les échanges d'énergie en surface et leur variabilité spatiale. Cela a poussé les modélisateurs à développer des modèles de surface plus élaborés prenant en compte les effets de la végétation.

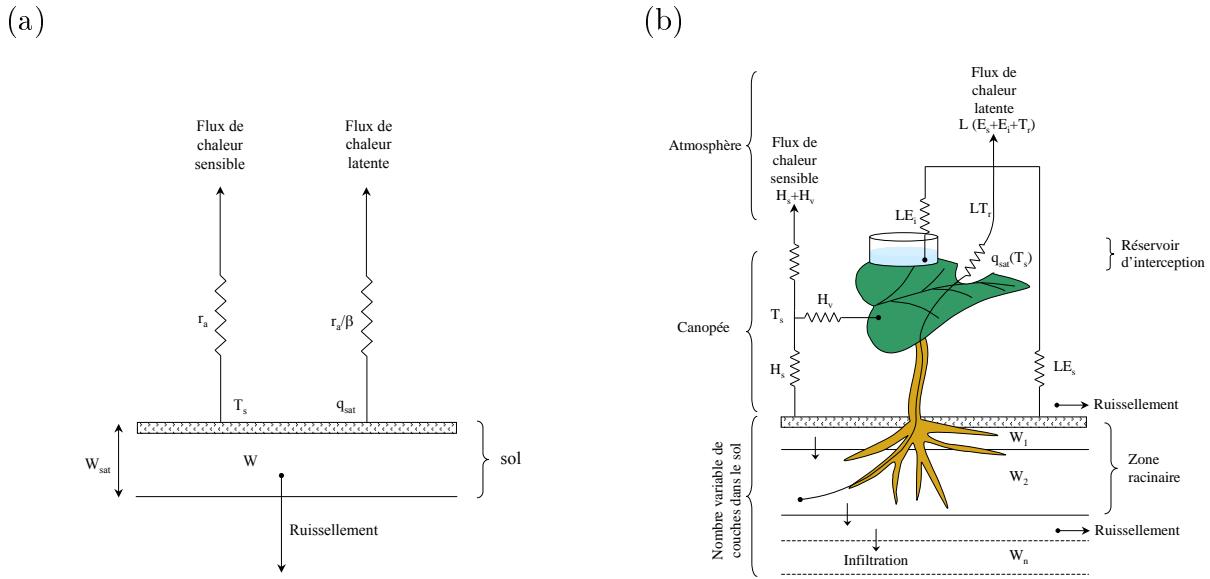


FIG. 3.1 - Schéma du type de modèle de surface «Bucket» à gauche et «Big-Leaf» à droite.

3.1.2 Études relatives à l'impact de la végétation

Le modèle Big-Leaf

Les premiers modèles du système sol-végétation développés sont souvent appelés modèles «Big-leaf», car ils modélisent la canopée comme une seule grosse feuille. Ces modèles transposent les phénomènes connus à l'échelle de la feuille à l'échelle du couvert végétal dans son ensemble. La figure 3.1b schématisse le principe général de fonctionnement de ces modèles. La principale nouveauté est la prise en compte explicite de l'évapotranspiration par la végétation. Le terme évapotranspiration n'est pas toujours employé avec le même sens. Ici, l'évapotranspiration représentera la somme de la transpiration (eau du sol extraite par la végétation) et de l'évaporation du réservoir d'interception (évaporation de l'eau présente sur les feuilles après la pluie).

La transpiration est calculée suivant la formule :

$$T_r = \beta \rho \frac{q_{sat}(T_s) - q(T_a)}{r_a + r_s} \quad (3.6)$$

Par rapport à l'équation 3.4, on ajoute donc une résistance supplémentaire, appelée résistance stomatique r_s , qui représente la résistance du végétal à la transpiration. (?) a proposé une paramétrisation de cette résistance de la forme :

$$r_s = r_{smin} f(PAR) f(CO_2) f(\Psi) f(\delta e) f(T) \quad (3.7)$$

où r_{smin} est la résistance stomatique minimale, PAR (photosynthetic active radiation) est la partie du rayonnement solaire utilisable pour la photosynthèse, Ψ représente le stress hydrique subit par le végétal, δe représente la différence de saturation entre la feuille et l'air environnant, et T est la température de la feuille. Cette équation permet de prendre en compte les principaux facteurs environnementaux qui contrôlent l'ouverture des stomates et la photosynthèse. La résistance stomatique minimale est, elle, fonction du type de plante considéré. Dans les modèles des années 1980 et 1990, l'influence du CO₂ n'était pas prise en compte dans les modèles de surface, le terme $f(CO_2)$ est ainsi souvent gardé constant.

La formulation de l'évaporation de l'équation 3.4 est conservée pour l'évaporation du sol E_s . En revanche, des formulations plus élaborées du terme β que celle proposée par ? (?) sont utilisées. Ces modèles simulent aussi l'interception des précipitations par le feuillage. Une partie des pluies reste sur le feuillage et n'atteint pas le sol avant d'être évaporée (terme E_i). L'évaporation de l'eau interceptée suit aussi la formulation de l'équation 3.4 mais en prenant $\beta = 1$.

Une autre amélioration importante de la modélisation concerne la disponibilité en eau du sol. La profondeur des racines détermine la quantité d'eau disponible pour la transpiration. Le sol est ainsi divisé en plusieurs couches avec modélisation de l'infiltration entre les couches et de la température des différents réservoirs. La plupart de ces modèles incluent également une paramétrisation de la neige et du gel de l'eau dans le sol.

? (?) ont montré que ces nouveaux modèles amélioraient notablement la simulation des flux en surface à l'échelle mensuelle. La meilleure représentation physique des phénomènes s'accompagne bien d'une amélioration des simulations. ? (?) montrent que la prise en compte de la végétation améliore la simulation de la mousson, en particulier son intensité et la répartition des précipitations.

Études de sensibilité à la végétation

Ces nouveaux modèles sont plus réalistes mais ils nécessitent de spécifier un certain nombre de paramètres qui dépendent du type de végétation. Le liste des paramètres à spécifier dépend du modèle, mais on peut citer au moins l'albédo de la végétation, sa longueur de rugosité, son émissivité, sa résistance stomatique minimale ainsi que la profondeur des racines (ou le profil racinaire). En général, quelques types de végétation sont définis et l'on détermine les paramètres moyens pour chaque type. Une cartographie des types de végétation permet ensuite d'obtenir une cartographie des paramètres. Cette étape de détermination des paramètres a été facilitée par le développement des observations satellitaires.

Les premiers modèles de ce type sont BATS (?) et SIB (?). Grâce à ces nouveaux modèles, de nombreuses études de sensibilité du climat à la couverture végétale ont pu être menées. La nouvelle formulation permet de modifier de façon cohérente toutes les propriétés de la végétation plutôt que de ne changer qu'une seule caractéristique de la surface comme cela était fait auparavant.

De nombreuses expériences de déforestation ont ainsi été menées (?; ?; ?; ?; ?; ?). Dans ces expériences, la forêt tropicale est remplacée par de la prairie. Ces études montrent une réduction de l'évaporation sur la région déforestée ainsi qu'une augmentation de la température en surface. La plupart d'entre elles simulent une réduction des précipitations locales par diminution du recyclage continental. ? (?) ont montré que ces modifications du climat régional peuvent avoir un impact sur la circulation générale par l'intermédiaire des cellules de Hadley. ? (?), ? (?), ? (?) se sont plus spécifiquement intéressés à la désertification sur le Sahel en simulant une diminution de la couverture végétale dans ces régions. Ces études montrent aussi une réduction de l'évaporation et une diminution des précipitations locales.

D'autres études se sont intéressées à l'impact de la forêt boréale aux hautes latitudes. Ainsi, ? (?) ont montré que le remplacement de la toundra par la forêt boréale entraîne un fort réchauffement aux hautes latitudes en hiver en raison de l'effet masquant de la forêt sur la neige, et donc d'une très forte réduction de l'albédo. Ils simulent aussi un réchauffement en été en raison d'une rétroaction des océans : le fort réchauffement hivernal induit une augmentation de température de l'océan aux hautes latitudes, anomalie qui, du fait de l'inertie thermique des océans, perdure jusqu'en été. Une autre étude (?) a montré que la végétation des hautes latitudes pouvait avoir joué un rôle important de rétroaction positive durant l'holocène : le réchauffement induit par la modification de l'orbite terrestre pourrait avoir été largement amplifié par l'extension vers le nord de la forêt boréale provoquée par ce réchauffement. Ces études ont bien montré la forte interactivité du système couplé surface-atmosphère.

Ces premières études ont souvent procédé à des changements radicaux de la couverture végétale. Des études plus récentes ont procédé à des changements de couverture végétale plus réalistes. Ainsi plusieurs études ont analysé l'impact des modifications de la distribution de la végétation survenues au cours des derniers siècles (?; ?; ?), ces changements étant majoritairement dus à l'utilisation des sols. ? (?) montrent que la réduction du couvert végétal a un impact opposé au printemps et en été dans les régions méditerranéennes. Au printemps, une végétation plus dense favorise l'évaporation et provoque un refroidissement. Le réservoir d'eau étant plus rapidement vidé, la végétation subit ensuite un plus fort stress hydrique au milieu de l'été, qui se traduit par une forte réduction de l'évaporation et une augmentation des températures. ? (?) réalisent le même type de simulation sur la Chine et simulent plutôt un refroidissement lors des changements de végétation

de «peu dense» à «dense». Ces résultats quelque peu contrastés montrent que les changements de végétation induisent des changements de plusieurs paramètres qui peuvent avoir des effets opposés. La combinaison non-linéaire de ces effets peut ainsi expliquer que les différents modèles simulent des impacts différents. ? (?) et ? (?) ont réalisé ce type d'étude en global. Ils montrent que les changements survenus sous les tropiques ont un impact opposé à ceux survenus aux moyennes latitudes, et qu'il n'y a pas d'impact en moyenne globale. En revanche, de tels changements de végétation peuvent aussi modifier la circulation et engendrer des perturbations sur d'autres régions que celles directement concernées par les changements de végétation.

Dans la plupart de ces études, les cartes de végétation utilisées pour représenter la végétation des derniers siècles étaient des cartes dites de végétation potentielle. Ces cartes sont produites par des modèles de végétation à l'équilibre (?), qui sont basés sur le principe de la correspondance entre les zones de végétation et le climat. Ils évaluent ainsi le type de végétation qui serait en place si le système climat-végétation était en équilibre. Toutefois, même sans l'action de l'homme, cette vision est erronée car la végétation subit des perturbations d'origine naturelle (feux, maladies, parasites,...). Cette approche, si elle peut être utilisée en première approximation pour évaluer la végétation des siècles passés, est peu utile pour les simulations du futur. Vu le rythme quasi-exponentiel de l'augmentation de la concentration en GHGs et du changement climatique associé, le XXI^{ème} siècle est plutôt une phase de transition pour laquelle l'approche à l'équilibre est peu adéquate.

3.1.3 Développements actuels

Actuellement, la tendance est d'évaluer l'impact des futurs changements de végétation sur le climat, et les interactions entre les changements de végétation et l'augmentation de concentration des gaz à effet de serre (?; ?). Les modèles de surface présentés précédemment permettent de simuler les échanges d'eau, d'énergie et de quantité de mouvement en surface mais ne représentent pas les échanges de carbone qui jouent pourtant un rôle prépondérant dans la dynamique de la végétation associée à l'augmentation de la concentration en CO₂. Pour répondre à cette problématique, de nouveaux modèles simulant les échanges de carbone entre l'atmosphère et la biosphère ont été développés (?; ?). Ces nouveaux modèles représentent la photosynthèse de façon plus explicite que dans la formulation de ? (?). La représentation des autres processus (ruissellement, drainage, interception) est, elle, restée très proche des modèles de surface classiques.

Parallèlement, les biologistes ont développé des modèles d'écosystèmes qui simulent l'évolution de la biomasse. Ils simulent l'évolution de plusieurs réservoirs de carbone (feuilles, branches, racines, sol, ..) ainsi que les échanges de matière entre ces différents réservoirs. Ils simulent aussi la dynamique de la végétation, c'est à dire la compétition

entre les différentes espèces et donc la modification de la répartition de la végétation. La tendance actuelle est ainsi à coupler ces deux types de modèles afin de simuler toute l'évolution du couvert végétal et de la biomasse de façon dynamique avec un cycle du carbone complet (TRIFFID (?), IBIS (?), LPJ (?)). Ces nouveaux modèles permettent ainsi de simuler de façon plus physique des changements de végétation associés au changement de climat, ils sont plus appropriés que les modèles d'équilibre.

Toutefois ces modèles ne simulent que l'évolution de la végétation naturelle, ils ne prennent pas en compte les modifications de l'utilisation des sols. Le travail présenté ici consiste à intégrer ces modifications de l'utilisation des sols dans une simulation climatique du XXI^{ème} siècle. Dans ce but, le modèle IMAGE a une approche intermédiaire : il simule l'évolution de l'utilisation des sols, ainsi que l'évolution de la végétation naturelle. Pour la végétation naturelle, il utilise une approche un peu plus simple que celle des modèles cités plus haut mais toutefois plus élaborée qu'une simple carte de végétation potentielle (voir chapitre précédent). Pour simuler les flux en surface dans le modèle atmosphérique, nous utilisons un modèle de surface de type «Big-Leaf», ISBA, qui ne simule pas les échanges de carbone en surface. Nous nous intéressons principalement à l'impact des changements de végétation sur les flux d'eau, d'énergie et de quantité de mouvement en surface. Le modèle ISBA a bien une version qui simule la photosynthèse, nommée ISBA-A-gs, mais cette version n'est pas encore couplée au modèle atmosphérique ARPEGE-Climat. Le travail présenté ici est donc une première étape dans l'inclusion de toute la dynamique de la végétation dans un modèle de climat. Il est à noter que pour le présent travail, l'impact de la biosphère sur le cycle du carbone est néanmoins modélisé par le modèle IMAGE, qui calcule la photosynthèse de la végétation au travers de paramétrisations simplifiées.

3.2 ISBA et spécification de ses paramètres de la végétation

3.2.1 ISBA

Le modèle ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) a été développé dans le souci de limiter le nombre de paramètres à spécifier, de manière à rendre son utilisation simple dans un modèle global. Une description détaillée du modèle est présentée dans ? (?) et ? (?). Parmi ses caractéristiques spécifiques, on note quelques aspects importants :

- ▶ Il y a seulement deux couches de sol, un réservoir de surface d'épaisseur $d_s = 1\text{cm}$, de contenu en eau w_s et de température T_s , et un réservoir profond, de contenu en eau w_2 et de température T_2 , dont l'épaisseur d_2 dépend du type de végétation et du type de sol de la maille.

- ▶ Les transferts d'eau et de chaleur dans le sol se font suivant la méthode «force-restore» de ? (?). Les équations pronostiques sont les suivantes :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_T(R_n - H - LE) - \frac{2\pi}{\tau}(T_s - T_2) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\tau}(T_s - T_2) \quad (3.9)$$

où C_T est le coefficient thermique du système sol-végétation, il est fonction du type de végétation et du type de sol.

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{C_1}{\rho_w d_s}(P - E_s) - \frac{C_2}{\tau}(w_s - w_{s_{eq}}) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2}(P - E_s - T_r) - D_r \quad (3.11)$$

Les coefficients thermo-hydriques C_1 et C_2 sont calibrés en fonction de la texture et de l'humidité des sols. $w_{s_{eq}}$ est le contenu en eau du réservoir superficiel à l'équilibre. ρ_w est la masse volumique de l'eau liquide et D_r représente le drainage profond.

- ▶ Le modèle inclut aussi une paramétrisation de la neige, avec diminution de l'albédo et augmentation de sa densité lors de son vieillissement. Cette paramétrisation est décrite en détail dans ? (?). Le gel de l'eau du sol est représenté suivant la méthode proposée par ? (?).
- ▶ Le modèle calcule une seule température pour tout le système surface-végétation appelée température de surface et notée T_s .
- ▶ Pour l'évaporation du sol nu, le modèle utilise la formule suivante :

$$E_s = (1 - veg)\rho_a \frac{h_u q_{sat}(T_s) - q(T_a)}{r_a} \quad (3.12)$$

le terme β du modèle général est remplacé par le terme h_u et n'intervient plus que pour moduler le $q_{sat}(T_s)$. Ce type de paramétrisation est dit «en alpha» (par opposition à la formulation en «beta» présentée à l'équation 3.6). Le terme r_a est calculé en fonction de la stabilité de l'atmosphère et du vent en surface. h_u prend la formulation suivante :

$$\begin{aligned} & \text{si } w_2 \geq w_{fl} \quad h_u = 1 \\ & \text{si } w_2 < w_{fl} \quad h_u = \frac{1}{2}(1 - \cos(\frac{w_2}{w_{fl}}\pi)) \end{aligned} \quad (3.13)$$

où w_{fl} correspond au w_{seuil} du modèle de Manabe.

La transpiration est calculée conformément à l'équation 3.6 mais seulement par la partie de feuillage qui n'est pas recouverte d'eau :

$$T_r = veg(1 - \delta)\rho \frac{q_{sat}(T_s) - q(T_a)}{r_a + r_s} \quad (3.14)$$

où δ est la fraction de feuillage recouverte d'eau. La résistance stomatique est calculée suivant la formule de Jarvis donnée à l'équation 3.7, sans prise en compte de l'effet du CO₂. L'évaporation du réservoir d'interception E_i est calculée simplement :

$$E_i = veg\delta\rho \frac{q_{sat}(T_s) - q(T_a)}{r_a} \quad (3.15)$$

et le flux de chaleur sensible est calculé conformément à l'équation 3.3.

La végétation dans ISBA est entièrement décrite par huit paramètres, parmi ceux-ci, cinq ont un cycle saisonnier :

- la proportion de végétation (*veg*)
- l'indice foliaire (*LAI*)
- la longueur de rugosité (*z₀*)
- l'albédo
- l'émissivité

Les 3 autres paramètres n'ont pas de cycle :

- la profondeur racinaire
- la résistance stomatique minimale (*r_{smin}*)
- la contribution de la végétation au coefficient thermique du sol *C_T* (cf équation 3.8).

Un point de grille regroupe différents types de végétation. Dans ISBA, on agrège les paramètres de chacun des types de façon à obtenir un paramètre équivalent représentatif des différents types présents dans la maille. En pratique, pour beaucoup de paramètres qui ont un effet linéaire sur les flux, l'agrégation consiste à faire une simple moyenne pondérée par la surface couverte par chaque type de végétation dans la maille. Pour quelques paramètres qui n'ont pas un impact linéaire, comme la longueur de rugosité et la résistance stomatique, des relations plus complexes sont utilisées (?) :

$$\frac{LAI}{r_{smin}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{LAI}{r_{smin,i}} \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{\ln^2(10/z_0)} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{1}{\ln^2(10/z_{0,i})} \quad (3.17)$$

3.2.2 Attribution des paramètres de la végétation

Dans sa version standard, ISBA utilise des cartes de paramètres de la végétation fournies par la base de données ECOCLIMAP (?), récemment élaborée au sein du CNRM. Cette base de données a été préparée à partir de données satellitaires (albédo, NDVI) et de mesures locales. Elle repose sur la classification en types de végétation proposée par

		Catégories IGBP										
		Evergreen Needleleaf	Evergreen Broadleaf	Deciduous Needleleaf	Deciduous Broadleaf	Mixed Forest	Woodland	Wooded Grassland	Closed Shrubland	Open Shrubland	Grassland	Crop
Crop											*	
Grazing Land							*	*	*	*		
Tundra								*	*	*		
Wooded Tundra						*	*	*	*			
I	Boreal F.	*	*	*								
M	Cool Conifer F.	*	*	*								
A	Temp. Mixed F.	*	*	*	*	*						
G	Temp. Deciduous F.		*	*	*	*						
E	Warm Mixed F.	*	*	*	*	*						
	Grassland / Steppe							*	*	*		
	Shrub						*	*	*	*		
	Savanna						*	*	*			
	Tropical Woodland	*		*		*	*					
	Tropical Forest	*										

TAB. 3.1 - Table de correspondance possible entre les classes IMAGE et les classes IGBP

l'IGBP (International Geosphere-Biosphere Program), mais retient des caractéristiques différentes suivant les continents pour chaque type de végétation. Les cartes de répartition de la végétation fournies par IMAGE2.2 utilisent une classification en types de végétation différente (voir figure 2.19). Pour pouvoir utiliser les cartes de végétation fournies par IMAGE dans ISBA, il a donc fallu attribuer à chaque type de végétation d'IMAGE les paramètres nécessaires.

Le RIVM, qui a développé IMAGE, a aussi développé sa propre base de données de cartes historiques nommée Hyde (?). Ces cartes ne sont pas tout à fait des observations mais tentent de retracer l'évolution de l'utilisation des sols sur les 2 derniers siècles. Ces cartes utilisent la même classification de la végétation que dans IMAGE. Nous avons donc utilisé la carte Hyde de 1990, et l'avons comparée à la carte ECOCLIMAP qui est basée sur des données satellitaires des années 1992 et 1993 pour établir une correspondance entre les types de la classification IMAGE/Hyde et les propriétés de la végétation. Les deux cartes utilisées ont une résolution de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

L’attribution des paramètres à chaque type de végétation IMAGE s’est faite de la façon suivante : pour tous les points de grille classés dans le type IMAGE considéré, on a moyenné la valeur du paramètre fournie par la carte ECOCLIMAP au même endroit. Toutefois, les cartes ECOCLIMAP et Hyde n’étant pas nécessairement cohérentes, nous avons retiré de la moyenne les points pour lesquels les classes n’étaient pas compatibles. Ainsi, un point classé en forêt boréale dans Hyde, et en toundra dans ECOCLIMAP n’est pas pris en compte dans la moyenne. Le tableau 3.2.2 donne les classes pour lesquelles l’opération de moyenne est prise en compte pour chaque classe IMAGE. D’autre part, ce travail a été réalisé continent par continent, afin de refléter les fortes disparités retenues dans ECOCLIMAP entre les continents. Cette distinction régionale n’est pas opérée quand le nombre de points sur lesquels est effectuée la moyenne est trop faible. D’autre part, comme pour l’agrégation au sein d’un point de grille ISBA, nous avons utilisé les règles d’agrégation adéquates présentées à la section précédente. Les valeurs des paramètres ainsi déterminées sont tabulées dans l’annexe D.

3.3 Changement de végétation réaliste

3.3.1 Description des expériences réalisées

Protocole expérimental

Dans le chapitre précédent, nous avons testé la sensibilité d’IMAGE2.2 à des changements de climat produits par AOG. De manière analogue et avant de mettre en place le couplage entre AOG et IMAGE2.2, nous avons réalisé des expériences de sensibilité d’ARPEGE-Climat à des changements de végétation produits par IMAGE2.2. Pour ces expériences, nous utilisons uniquement le modèle atmosphérique que nous forçons par des températures de surface de la mer (TSMs) climatologiques. Une partie de la variabilité naturelle du système climatique est ainsi supprimée, ce qui permet d’augmenter le rapport signal/bruit et de mieux analyser l’impact des changements de végétation. Afin de comparer l’impact relatif des changements de végétation et des changements de concentration de gaz à effet de serre, une série de 4 simulations a été réalisée :

- ▶ CL1, simulation avec la carte de végétation IMAGE2.2 de 1980 (figure 3.2), des TSMs de la climatologie de ? (?) moyennées sur la période 1970-1989, et une concentration en CO₂ de 344ppm.
- ▶ FL1, simulation avec la carte de végétation IMAGE2.2 de 2050 pour le scénario B2. Les TSMs et les concentrations en GHGs sont les mêmes que pour la simulation CL1.

- ▶ CL2, simulation avec la carte de végétation de 1980, une concentration en CO₂ de 478ppm, et des TSMs pour la période 2040-2059.
- ▶ FL2, simulation avec la carte de végétation de 2050, et les TSMs et la concentration en CO₂ de la simulation CL2.

Les TSMs pour la période 2040-2059 sont calculées à partir d'une simulation scénario de type B2 déjà réalisée avec AOG. Nous utilisons les anomalies moyennes de la période 2040-2059 par rapport à la période 1970-1989, et nous les ajoutons aux TSMs climatologiques de Reynolds utilisées dans les simulations FL1 et CL1. Ce jeu de 4 expériences de type time-slice, c'est-à-dire avec des forçages fixes, permet ainsi de mettre en évidence de manière équivalente le signal lié au changement de carte de végétation et au changement de concentrations en GHGs. Pour ces simulations, nous avons utilisé les résultats d'un scénario B2 car c'est le scénario pour lequel le rapport «intensité des changements de végétation/intensité des changements de concentration en GHGs» est le plus fort. De même, nous avons choisi de simuler les changements de végétation obtenus en 2050, car les changements de végétation sont très importants en début de XXI^{ème} siècle dans ce scénario, alors que les concentrations GHGs n'augmentent fortement qu'en deuxième moitié de siècle. L'importance relative des changements de végétation est ainsi maximisée au milieu du XXI^{ème} siècle.

Pour faire ces simulations, nous avons utilisé ARPEGE-Climat avec une troncature T63 et 31 niveaux verticaux. La grille associée, dans laquelle est effectué le calcul des termes non linéaires et de la physique, est une grille 128×64 . Cette grille a un nombre de points plus réduit que les grilles de Gauss utilisées dans les modèles spectraux pour le calcul exact des termes quadratiques. Cette grille, de résolution 2.8° , est la grille «linéaire» permettant le calcul exact des termes quadratiques en T42. Elle est suffisante pour calculer les termes non linéaires en T63 selon les travaux de ? (?) et ? (?) qui ont montré que le nombre de points de grille nécessaires pour calculer les termes non-linéaires dans un modèle semi-Lagrangien est plus faible que le nombre de points nécessaires à un modèle spectral Eulérien. Cette résolution est celle qui est utilisée pour réaliser des simulations scénario du XXI^{ème} siècle, et sera utilisée pour les simulations couplées AOG/IMAGE2.2. Pour les 4 simulations, nous avons simulé un ensemble de 33 ans : chaque année utilise les mêmes forçages externes et sera donc considérée comme indépendante dans la suite de l'étude. Seules les 30 dernières années sont analysées, afin de laisser les réservoirs d'eau du sol s'équilibrer suite à l'introduction de nouvelles cartes de végétation et/ou d'un nouveau forçage radiatif.

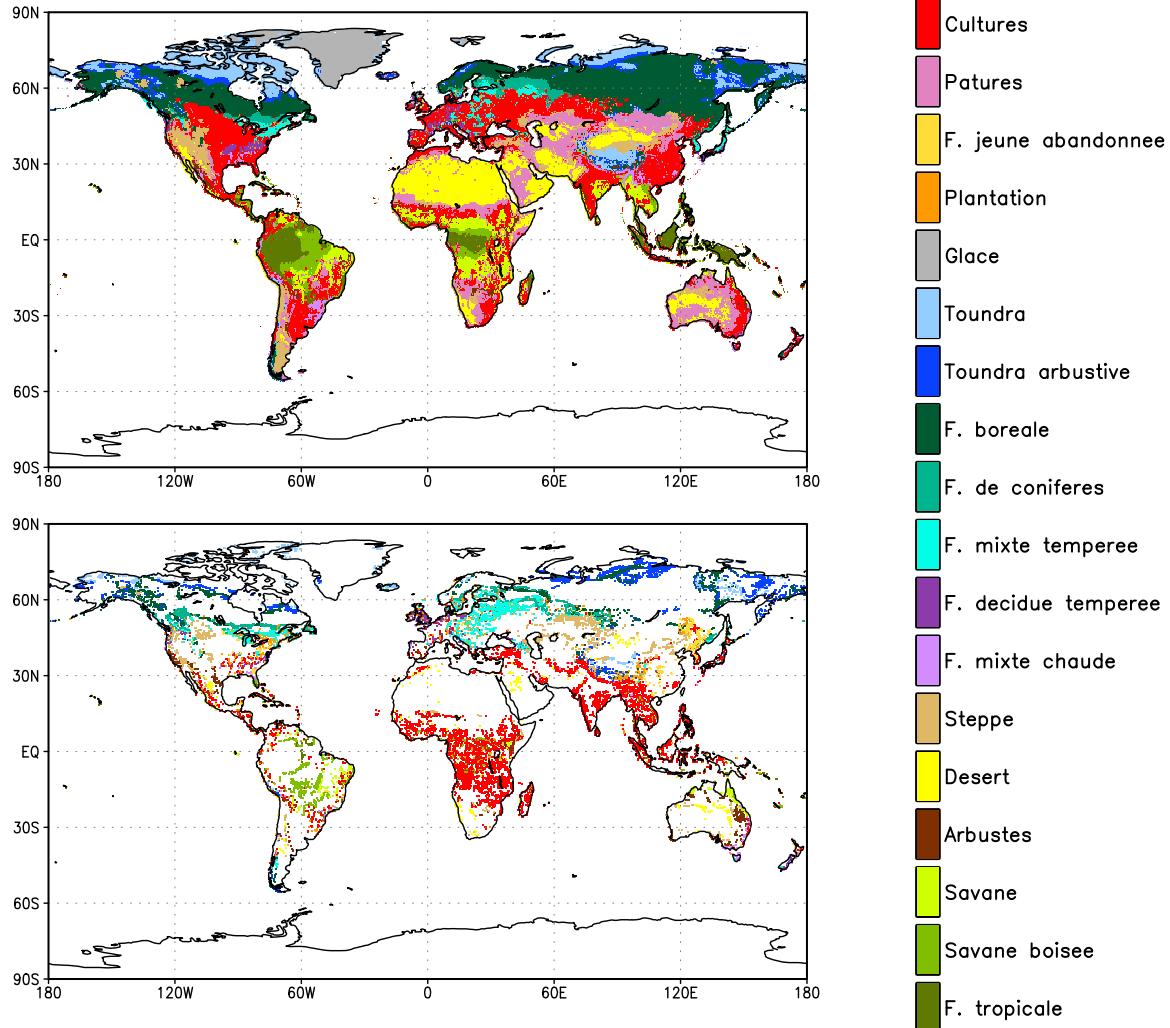


FIG. 3.2 - Carte de végétation de 1980 (en haut) et de 2050 (seuls les points pour lesquels la végétation a changé par rapport à 1980 sont indiqués)

Conditions de surface

Les changements de végétation simulés par IMAGE pour le scénario B2 sont un peu différents de ceux du scénario A2 présenté au chapitre précédent. IMAGE2.2 simule une plus forte extension des cultures sur l'Afrique, en revanche, sur l'Amérique du Sud, les sols sont peu utilisés, et l'on obtient une extension de la savane boisée aux dépens de la savane. Sur l'Est de l'Europe, on observe un remplacement massif des cultures par de la forêt mixte. Aux moyennes latitudes, on observe généralement un décalage des zones de forêt vers le nord : la forêt de conifères remplace la forêt boréale et la forêt boréale remplace la toundra dans sa frange nord. Cette simulation prévoit aussi une forte reforestation sur le nord-est de l'Asie (extrême Est de la Russie).

La figure 3.3 présente les changements de la proportion de végétation et de la profondeur de sol induits par ces changements de végétation. Les changements de propriétés de surface sont les plus importants sur l'Afrique centrale où la forêt tropicale a été largement remplacée par des cultures. Les changements sur les autres régions sont plus mesurés.

Les anomalies zonales des changements de propriétés de surface (figure 3.4) montrent que les changements opérés aux moyennes latitudes sont opposés à ceux survenus aux tropiques. On remarque aussi la très forte réduction de l'albédo et l'augmentation de la résistance stomatique du couvert au nord de 70°N, du fait du remplacement de la toundra par de la forêt boréale. Aux tropiques, la résistance stomatique est un peu réduite car les cultures ont une résistance un peu plus faible que la savane.

Dans la suite de ce chapitre, on utilise un test de Student pour tester statistiquement la significativité des impacts obtenus. Pour ce test, nous considérons que les années de simulations sont indépendantes statistiquement, hypothèse qui n'est pas tout à fait vérifiée. Pour être plus rigoureux, il faudrait déterminer un nombre d'années équivalent, inférieur au nombre d'années des simulations, et qui reflèterait le nombre de degrés de liberté à appliquer au test. Toutefois, la figure 7 de l'annexe F, montre que la valeur du test à appliquer décroît rapidement pour des petits échantillons puis diminue peu lorsque le nombre de degrés de liberté est de l'ordre de 15. Pour des variables atmosphériques, l'autocorrélation n'est pas très forte et avec des simulations de 30 ans, on peut considérer que l'on a effectivement au moins 15 degrés de liberté (l'autocorrélation des champs océaniques est souvent beaucoup plus importante et cette hypothèse n'est alors plus correcte).

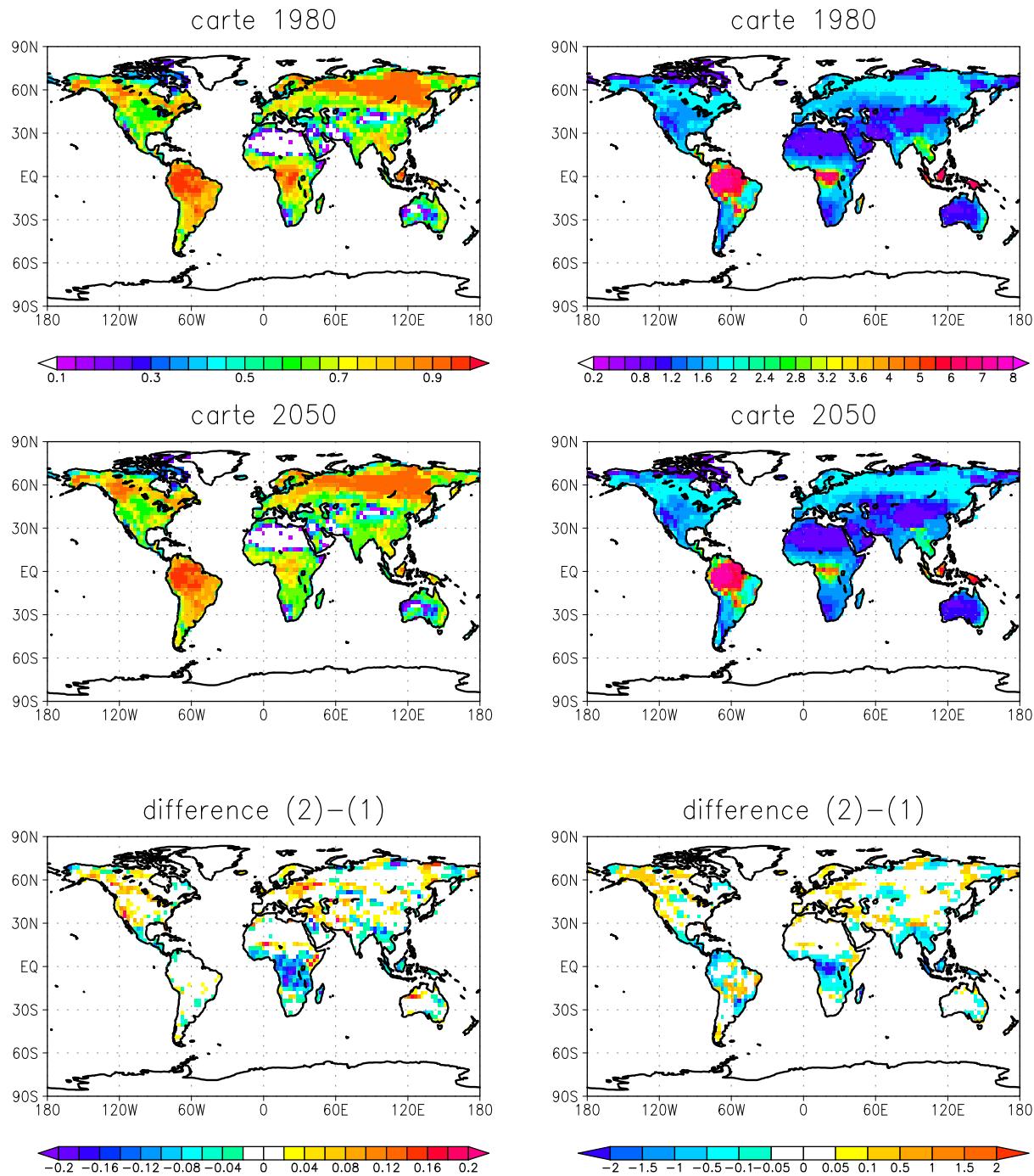


FIG. 3.3 - Carte de la proportion de végétation (à gauche) et de profondeur de sol en mètres (à droite) pour 1980 et 2050 ainsi que les différences entre les deux cartes.

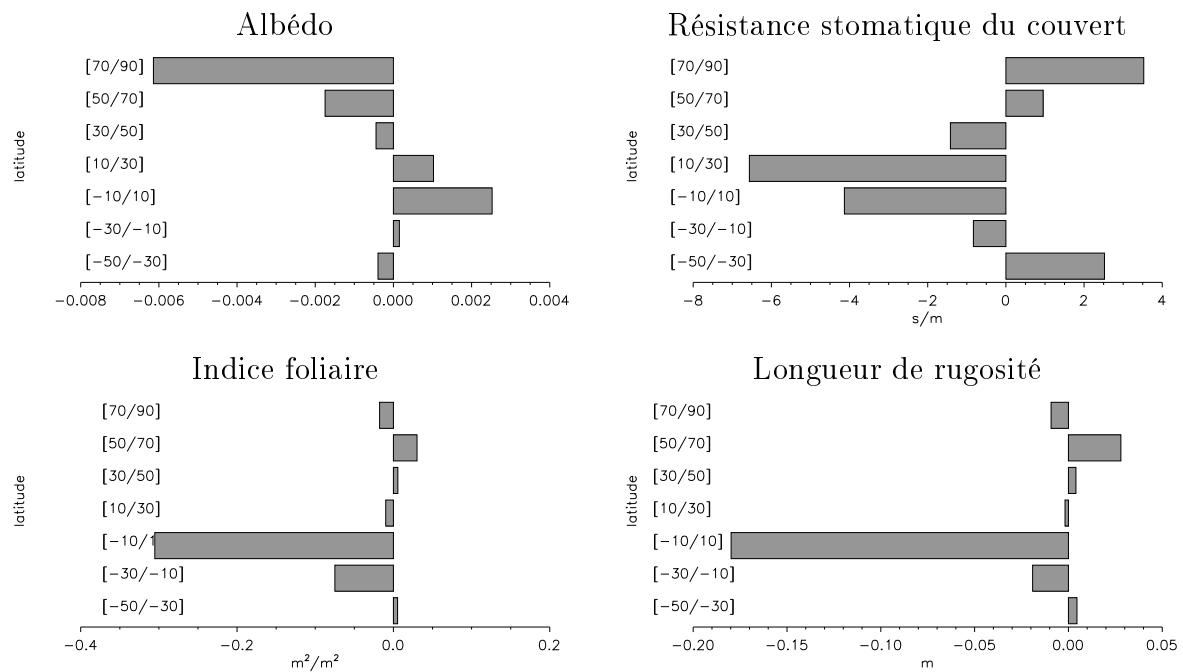


FIG. 3.4 - Anomalies zonales des propriétés de surface pour l'albédo, la résistance stomatique à l'échelle du couvert, l'indice foliaire et la longueur de rugosité entre la carte de 2050 et la carte de 1980.

3.3.2 Comparaison des impacts du changement de végétation et du changement de concentration en GHGs

Température de l'air en surface

L'impact global du changement de carte de végétation sur la température de surface est nettement moins important que l'impact de l'augmentation des GHGs (figure 3.5). Sous l'effet des GHGs, la température de surface augmente partout, alors que sous l'effet du changement de végétation, la température diminue ou augmente suivant les régions. Le changement de végétation va donc amplifier le changement climatique lié aux GHGs dans certaines régions et plutôt le limiter dans d'autres.

L'impact des changements de végétation est d'un ordre de grandeur plus faible mais est statistiquement significatif selon un test de Student sur plusieurs régions. Quel que soit le climat de la simulation (TSMs & GHGs de 1980 ou de 2050), l'impact des changements de végétation sur la température est assez similaire. On obtient dans les deux cas, une augmentation de la température aux moyennes latitudes, dans les régions où de la forêt mixte a remplacé les cultures. On observe une réduction de la température sur le sud de l'Asie dans les régions où les cultures se sont étendues, sauf sur l'est de l'Inde. Sur l'Afrique, on remarque un impact très similaire entre les deux expériences avec une diminution des températures à l'équateur et une augmentation dans les régions tropicales. Le test de Student semble indiquer que les impacts mis en évidence sur les continents sont statistiquement significatifs. En dehors des régions continentales, le test de Student indique des régions où il y aurait des impacts significatifs, mais d'amplitude inférieure à 0.2°C. Sur les océans, comme la température de surface est fixée dans la simulation, la température de l'air ne peut évoluer fortement. Cela soulève la question d'un possible impact des changements de végétation sur la température de l'océan. On remarque que sur les océans, les impacts ne sont pas du tout cohérents entre les deux simulations.

Pour quantifier l'impact des changements de végétation par rapport à l'impact de l'augmentation des concentrations en GHGs, nous avons calculé le diagnostic suivant :

$$\frac{|\Delta T_{veg}|_{GHG_{1980}} + |\Delta T_{veg}|_{GHG_{2050}}}{|\Delta T_{GHG}|_{veg_{1980}} + |\Delta T_{GHG}|_{veg_{2050}}} = \frac{|T_{FL1} - T_{CL1}| + |T_{FL2} - T_{CL2}|}{|T_{CL2} - T_{CL1}| + |T_{FL2} - T_{FL1}|} \quad (3.18)$$

Ce rapport représente l'amplitude relative du signal dû au changement de carte de végétation par rapport au signal de changement des concentrations en GHGs. La figure 3.5d représente ce rapport sur les continents. L'amplitude de l'impact des changements de végétation est plutôt de l'ordre de 10% de l'amplitude des changements dus à l'augmentation de la concentration en GHGs. Ce rapport est localement un peu plus important sur les régions où les changements de végétation sont les plus intenses (Afrique, Est de l'Europe, Asie du Sud et Amérique du Nord), il atteint alors par endroits 30%.

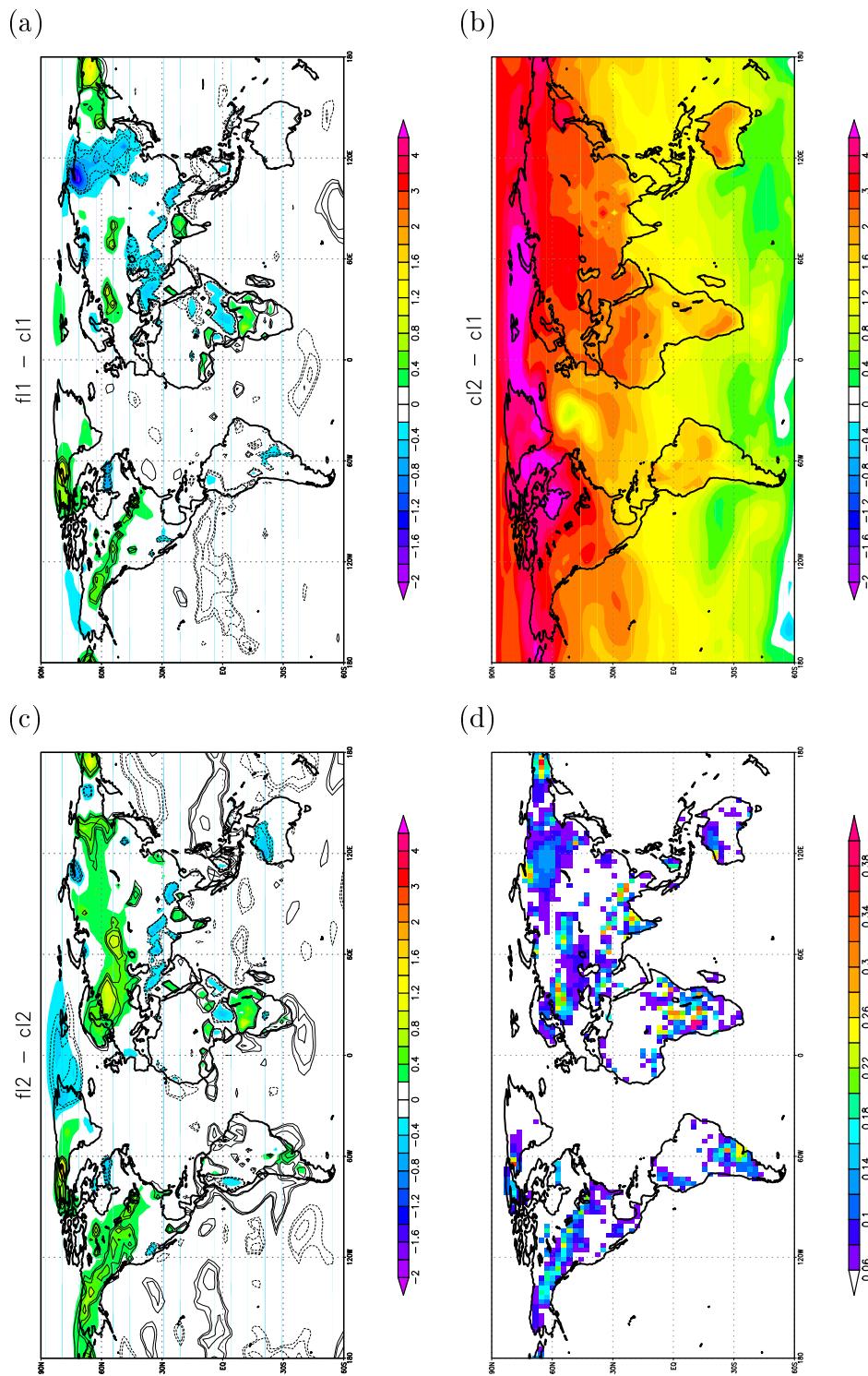


FIG. 3.5 - *Changement de température de l'air en surface en moyenne annuelle pour le changement de végétation sous le climat actuel (a), et sous le climat futur (c), pour le changement de concentration en GHGs avec la carte de végétation de 1980 (b). Les isolines délimitent les régions d'impact statistiquement significatifs au niveau de confiance 90%, 95% et 99%. La carte (d) représente la rapport $\frac{|\Delta T_{veg}|_{GHG1980} + |\Delta T_{veg}|_{GHG2050}}{|\Delta T_{GHG}|_{veg1980} + |\Delta T_{GHG}|_{veg2050}}$ (voir dans le texte).*

DJF	MAM	JJA	SON	Annuel
10%	13%	11%	8%	7%

TAB. 3.2 - *Moyenne spatiale du rapport de l'équation 3.18 pour les moyennes saisonnières et les moyennes annuelles de température de l'air en surface.*

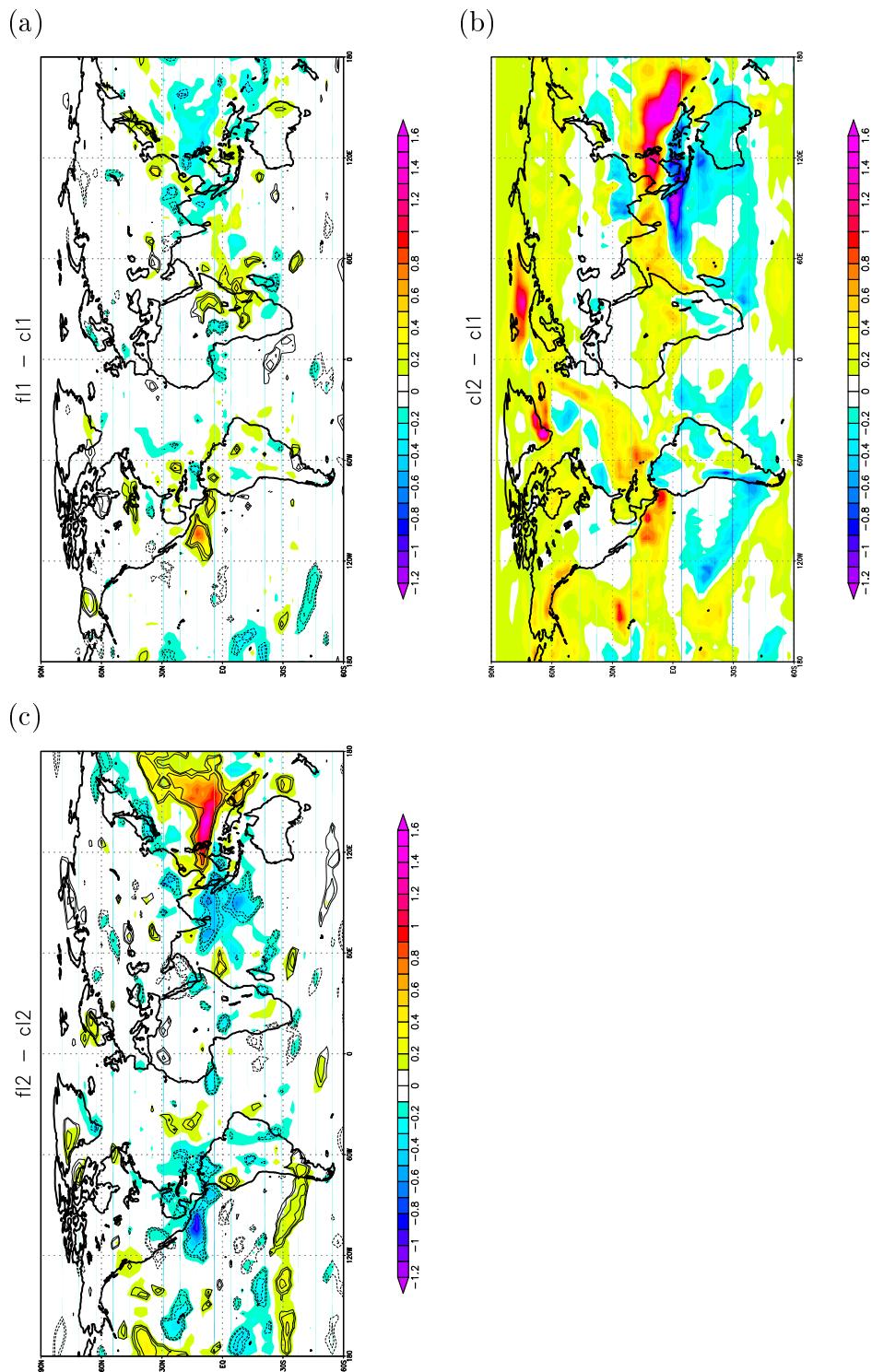
Le tableau 3.2 donne les moyennes spatiales de ce rapport sur les continents pour les moyennes saisonnières et la moyenne annuelle. Le rapport moyen est un peu plus important pour les moyennes saisonnières que pour la moyenne annuelle. Cela indique que l'impact des changements de végétation est relativement plus important sur les moyennes saisonnières. En terme de température, l'impact de l'augmentation de la concentration en GHGs est plutôt constante au cours de l'année, alors que l'impact des changements de végétation dépend beaucoup plus de la saison. La carte 3.5d sous-estime donc un peu l'importance relative des changements de végétation.

Précipitations

L'impact du changement de végétation sur les précipitations est encore plus localisé que pour les températures. On observe très peu de régions continentales où les impacts sont significatifs. De plus, la proportion de points pour lesquels les changements sont significatifs selon le test de Student est toujours inférieure à la puissance du test appliqué (que ce soit 90%, 95% ou 99%). Cela indique que le test n'est pas fiable. En effet, on pourrait obtenir le même nombre de points ayant un impact statistiquement significatif par chance, si l'on considère les différents points de grille comme indépendants. Hormis sur l'Afrique Équatoriale où l'on obtient une diminution des précipitations pour les deux expériences (sous climat 1980 et 2050), aucun autre impact continental ne semble cohérent entre les deux simulations. Sur les zones océaniques, les deux simulations donnent des résultats assez différents et on obtient beaucoup plus d'impacts sous le climat futur (FL2-CL2).

L'impact des changements de concentration de GHGs sur les précipitations est nettement plus étendu. Le diagnostic effectué sur les températures pour quantifier l'impact relatif des deux signaux n'est pas vraiment applicable à cette variable, car dans les régions où le modèle ne simule pas d'impact aux GHGs, le rapport tend vers l'infini et n'a plus de sens physique.

On retiendra de cette première analyse globale que l'impact des changements de végétation sur le climat est du second ordre par rapport à l'impact de l'augmentation de concentration en GHGs. Cependant, l'impact des changements de végétation vient moduler l'impact des changements de GHGs de façon différente selon les régions et les saisons.

FIG. 3.6 - *Idem figure 3.5 pour les précipitations.*

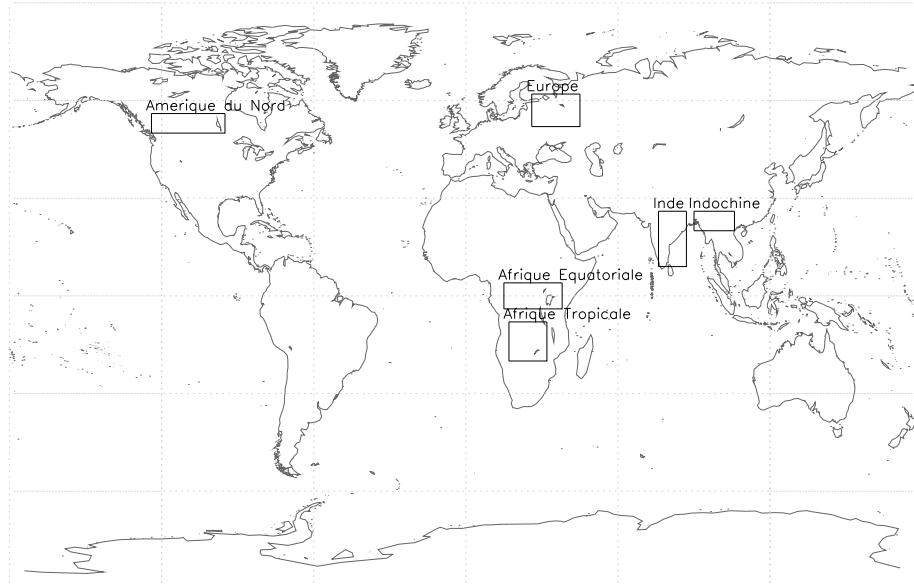


FIG. 3.7 - Domaines utilisés dans ce chapitre.

D'autre part, en moyenne annuelle, l'impact sur la température de surface est similaire quel que soit le forçage en TSMs et en GHGs utilisé, alors que l'impact sur les précipitations est variable. Ceci semble s'expliquer simplement : la température de surface est le résultat de la modification locale du bilan d'énergie, lui-même directement conditionné par les propriétés de la surface et donc par la végétation, alors que les précipitations sont le résultat de la dynamique atmosphérique et du cycle de l'eau. L'impact sur les précipitations est ainsi plus dépendant du climat de contrôle mais aussi probablement plus bruité.

3.3.3 Impacts régionaux des changements de végétation

Une première analyse globale a montré que les impacts des changements de végétation sont localisés et divers selon les régions et les changements de végétation imposés. Une étude un peu détaillée de plusieurs régions est présentée dans la suite de ce chapitre.

Régions tropicales

Dans les régions tropicales, 4 régions sont plus particulièrement étudiées (voir carte 3.7 et tableau 3.3) :

Région	TOT	STAB	Types de transitions	CHGE
Afrique Equatoriale	788	48%	F. Tropicale → Cultures	18%
			Savanne Boisée → Cultures	11%
			Savanne → Cultures	7%
			F. Tropicale → Plantation	3%
Afrique Tropicale	775	44%	Savanne → Cultures	37%
			Arbustes → Cultures	4%
Inde	537	68%	Savanne → Cultures	27%
Indochine	407	44%	F. Mixte Chaude → Cultures	20%
			Savanne → Cultures	16%
			Savanne Boisée → Cultures	11 %
Europe	809	52%	Cultures → F. Mixte Tempérée	29%
			F. Conifères → F. Mixte Tempérée	7%
Amérique du Nord	764	70%	F. Boréale → F. Conifères	9%
			Cultures → F. Conifères	4%
			Cultures → F. Boréale	4%

TAB. 3.3 - *Types de transitions principales rencontrées dans les régions étudiées. TOT indique le nombre total de points de grille compris dans la région à la résolution de 0.5°, STAB indique le pourcentage de points n'ayant pas changé de type de végétation et CHGE indique le pourcentage de points concernés par chaque type de transition.*

- ▶ l'**Afrique Équatoriale**, notée **AE** dans la suite, où plus de 50% de la surface a subi des changements de végétation. La majorité des transitions correspond au remplacement de la forêt tropicale par des cultures.
- ▶ l'**Afrique Tropicale**, notée **AT**, où une grande partie de la savane est remplacée par des cultures.
- ▶ l'est de l'**Inde**, notée **ID**, où l'on observe le même type de transition que sur AT.
- ▶ le nord de la péninsule **Indochinoise**, notée **IC**, où la forêt mixte est remplacée par des cultures.

Le point commun à toutes ces régions est la forte pression anthropique. Les transitions sont déterminées par le besoin de terres cultivées, quelque soit le type initial de végétation.

D'après les cartes 3.5a et c, l'impact sur les températures n'est pas identique pour tous ces changements de végétation. Sur l'AE et l'IC, on observe plutôt un refroidissement, tandis que sur l'AT et l'ID on obtient plutôt un réchauffement de la température moyenne. Le cycle annuel des anomalies de température (figure 3.8) montre que l'impact sur la température moyenne n'est pas homogène au cours de l'année. On remarque aussi que le cycle annuel des anomalies est un peu différent selon le climat de contrôle. Ceci indique que si l'impact des changements de végétation est ressemblant en terme de moyenne annuelle, les impacts saisonniers sont plus dépendants du climat de contrôle.

Sur l'AE, le retrait de la forêt tropicale induit une diminution de la température minimale presque toute l'année pour les deux expériences tandis que l'impact sur la température maximale dépend de la saison. On observe ainsi une diminution de la température maximale sauf en JAS.

L'impact sur les températures minimales est spatialement très similaire dans les deux expériences (figure 3.10), cela suggère que ces impacts sont directement liés à des changements de propriétés de surface. Par ailleurs, pour la température minimale, ce sont les propriétés qui ont un impact nocturne qui peuvent être impliquées. Ainsi, deux facteurs peuvent expliquer des changements de température nocturnes : l'émissivité de la végétation qui contrôle le flux thermique (qui a un impact prépondérant la nuit), et le coefficient thermique de la végétation C_v qui contrôle le refroidissement nocturne en surface. Le coefficient C_v est la contribution de la végétation au coefficient C_T de l'équation 3.8, qui se calcule de la façon suivante :

$$\frac{1}{C_T} = \frac{veg}{C_v} + \frac{1 - veg}{C_s} \quad (3.19)$$

La carte 3.10 montre les anomalies de ces propriétés superposées aux anomalies de température minimale. On s'aperçoit que la diminution de température minimale est fortement corrélée spatialement à l'anomalie du coefficient thermique de la végétation. Cette corrélation s'explique bien physiquement : l'augmentation de ce coefficient thermique (qui correspond à une diminution de l'inertie) induit un plus fort flux de chaleur du sol vers la

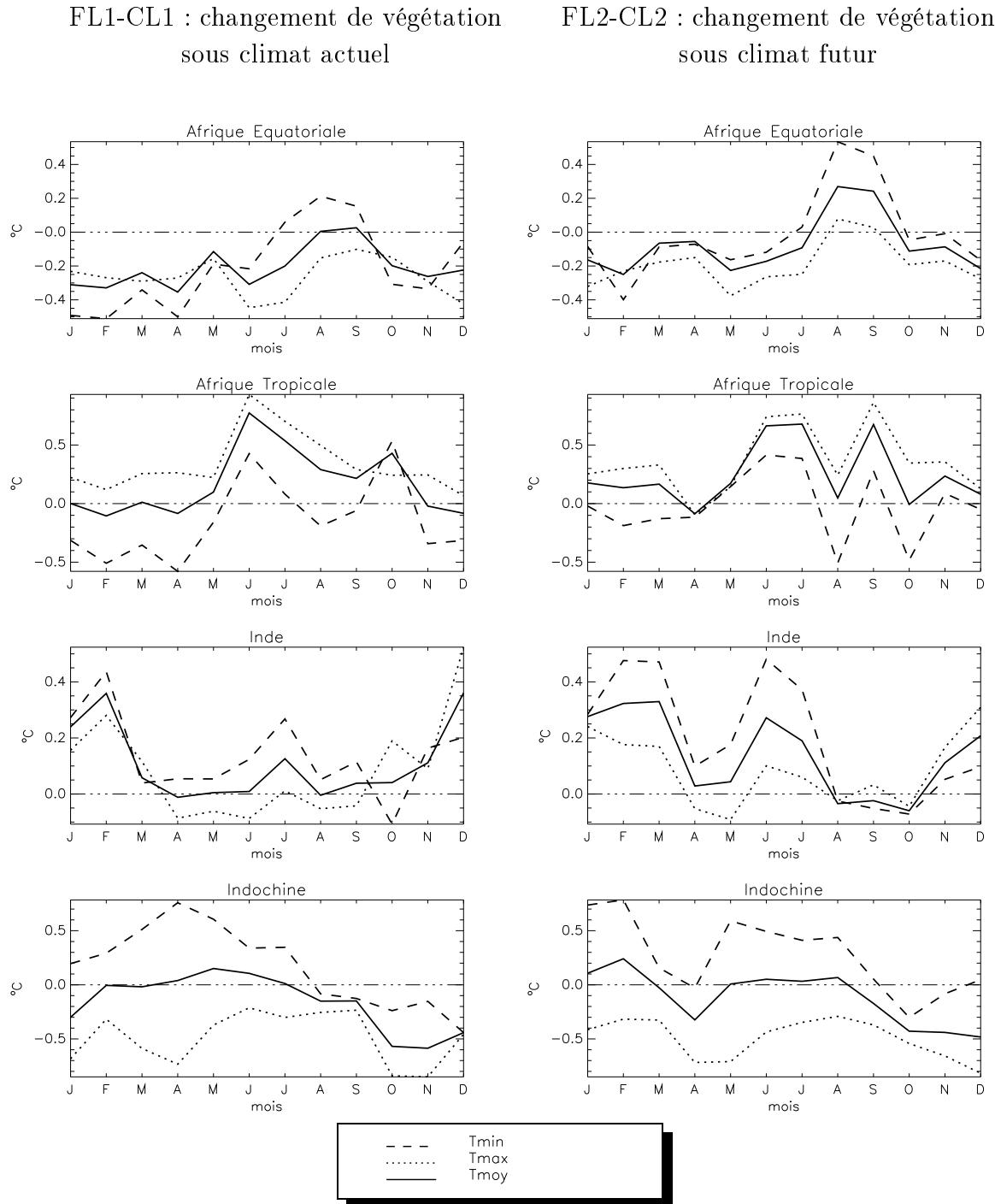


FIG. 3.8 - Cycle annuel moyen des anomalies de température moyenne, minimale et maximale pour les 4 régions tropicales étudiées (cf carte 3.7), entre les expériences CL1 et FL1 à gauche et entre CL2 et FL2 à droite. Ces anomalies représentent les changements dus au changement de carte de végétation.

surface la nuit et donc un refroidissement nocturne plus important (voir équation 3.8). On remarque que le coefficient thermique est modifié surtout dans les régions équatoriales, où la forêt est remplacée par des cultures. Le remplacement de la savane par des cultures plus au sud ne modifie pas ce facteur. D'autre part, l'assèchement du sol amplifie potentiellement l'augmentation du C_v par une augmentation du C_s . Malheureusement, ni le terme C_T , ni le terme C_s ne sont diagnostiqués dans notre modèle, ce qui ne permet pas de quantifier cet impact.

Sur l'AT, l'anomalie de température minimale est nettement corrélée à l'anomalie d'émissivité imposée. Cette corrélation a aussi un sens physique puisque la réduction de l'émissivité induit une réduction du flux thermique de la surface vers l'atmosphère et donc plutôt une augmentation de la température en surface. A priori l'émissivité a aussi un impact sur la température maximale mais en journée le flux solaire net intervient et le bilan est plus complexe. Sur l'AE, l'émissivité est aussi réduite mais il semble que l'impact de la modification du coefficient thermique soit prépondérant devant l'impact du changement d'émissivité.

L'impact des changements de végétation sur l'IC et l>ID confirme cette analyse. Là où le coefficient thermique augmente (sur le nord-est) la température minimale diminue, là où le coefficient thermique ne change pas, le changement de température minimale est corrélé avec le changement d'émissivité (que l'anomalie soit positive ou négative).

Pour la température maximale, l'analyse est un peu plus complexe, et plusieurs facteurs semblent interagir. La température maximale reflète le comportement diurne du système sol-végétation, et plus de facteurs entrent en jeu.

Sur l'AE, la diminution de température maximale d'octobre à juin semble être due à plusieurs facteurs, dont le plus important est la réduction de l'albédo qui limite le flux solaire net. Toutefois, le lien avec le changement des propriétés de surface est moins net et les deux simulations (climat de 1980 et de 2050) présentent des anomalies moins similaires. Cela semble indiquer que l'impact sur la température maximale dépend plus du climat de contrôle. Le réchauffement observé en JAS est très bien corrélé avec la diminution de l'évaporation (voir figure 3.11). Le cycle annuel de l'anomalie d'évaporation (figure 3.9) montre bien une diminution en cette saison pour les deux expériences. On remarque que l'évapotranspiration est réduite tout au long de l'année tandis que l'évaporation du sol nu augmente sous l'effet du changement de végétation. L'augmentation de l'évaporation du sol nu s'explique par l'impact mécanique de l'augmentation de la proportion de sol nu associé à la réduction de proportion de végétation. L'évapotranspiration diminue en raison de la diminution de la fraction de végétation ainsi que de la réduction de longueur de rugosité qui accroît la résistance aérodynamique. L'augmentation de l'évaporation du sol nu est seulement limitée à la saison sèche quand le sol est en situation de stress

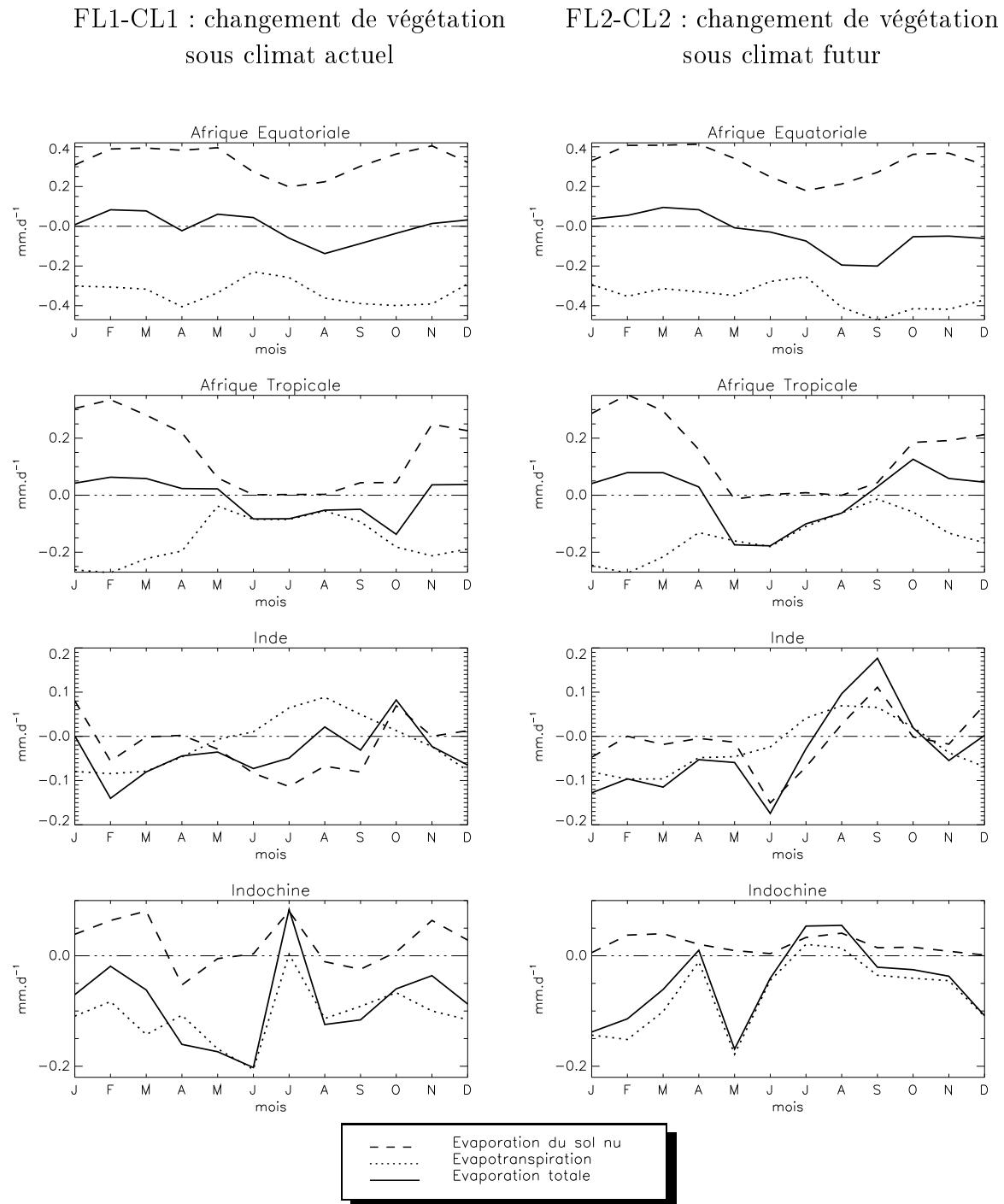


FIG. 3.9 - *Idem figure 3.8 mais pour l'évaporation totale, l'évapotranspiration et l'évaporation du sol nu.*

hydrique. Il en résulte que l'évaporation totale est peu modifiée la plupart du temps suite au changement de végétation sauf à la saison sèche, saison à laquelle l'évaporation du sol nu est limitée par la disponibilité en eau (celle-ci est réduite par la diminution de profondeur de sol).

On note que la diminution d'évaporation totale est un peu plus longue et un peu plus intense sous le climat futur. Cela suggère que sous un climat plus chaud, le stress hydrique persiste plus longtemps et l'impact du changement de végétation est alors plus crucial.

On observe le même phénomène de compensation de l'augmentation de l'évaporation du sol nu par la diminution de l'évapotranspiration sur l'AT, mais avec une saisonnalité plus marquée. L'anomalie de température maximale est à peu près anti-corrélée à l'anomalie d'évaporation, mais de façon moins nette. Sur cette région c'est l'augmentation de la température minimale qui domine le signal sur la température moyenne.

Sur l'ID l'impact du changement de végétation sur les différents termes de l'évaporation est plus faible. On observe toutefois comme sur l'Afrique que la diminution de l'évaporation de janvier à juin est corrélée à une augmentation de la température maximale. Sur l'IC, On n'observe quasiment pas d'impact sur l'évaporation du sol nu, et l'évapotranspiration est réduite une bonne partie de l'année.

Les anomalies de conditions de surface obtenues sur les régions tropicales diffèrent suivant les régions étudiées et la période de l'année. On a particulièrement mis en évidence que les transitions de la forêt vers les cultures ont un impact différent que les transitions de la savane vers les cultures. Les changements de végétation induisent des changements de propriétés de surface divers qui interagissent entre eux. L'impact des changements de végétation est ainsi le résultat de processus non-linéaires qu'il est parfois difficile d'analyser en détail. Pour les régions tropicales, la distinction des réponses en terme de température minimale et maximale permet toutefois de mieux comprendre les mécanismes impliqués.

Moyennes Latitudes

Aux latitudes tempérées, les régions où l'impact du changement de végétation sur la température moyenne est significatif sont peu nombreuses. La forte variabilité inter-annuelle de ces régions rend le signal difficilement détectable. On observe toutefois un réchauffement significatif sur le nord de l'Amérique et le nord-est de l'Europe. Nous avons utilisé deux boîtes centrées sur ces régions d'impact significatifs (voir carte 3.7). Sur l'Europe, les changements de végétation sont surtout dus à l'abandon de terres cultivées et à leur remplacement par de la forêt mixte tempérée. Il y a aussi quelques points de grille pour lesquels la forêt de conifères est remplacée par de la forêt mixte (voir tableau 3.3). Sur le nord de l'Amérique, les changements sont répartis également en deux types : rem-

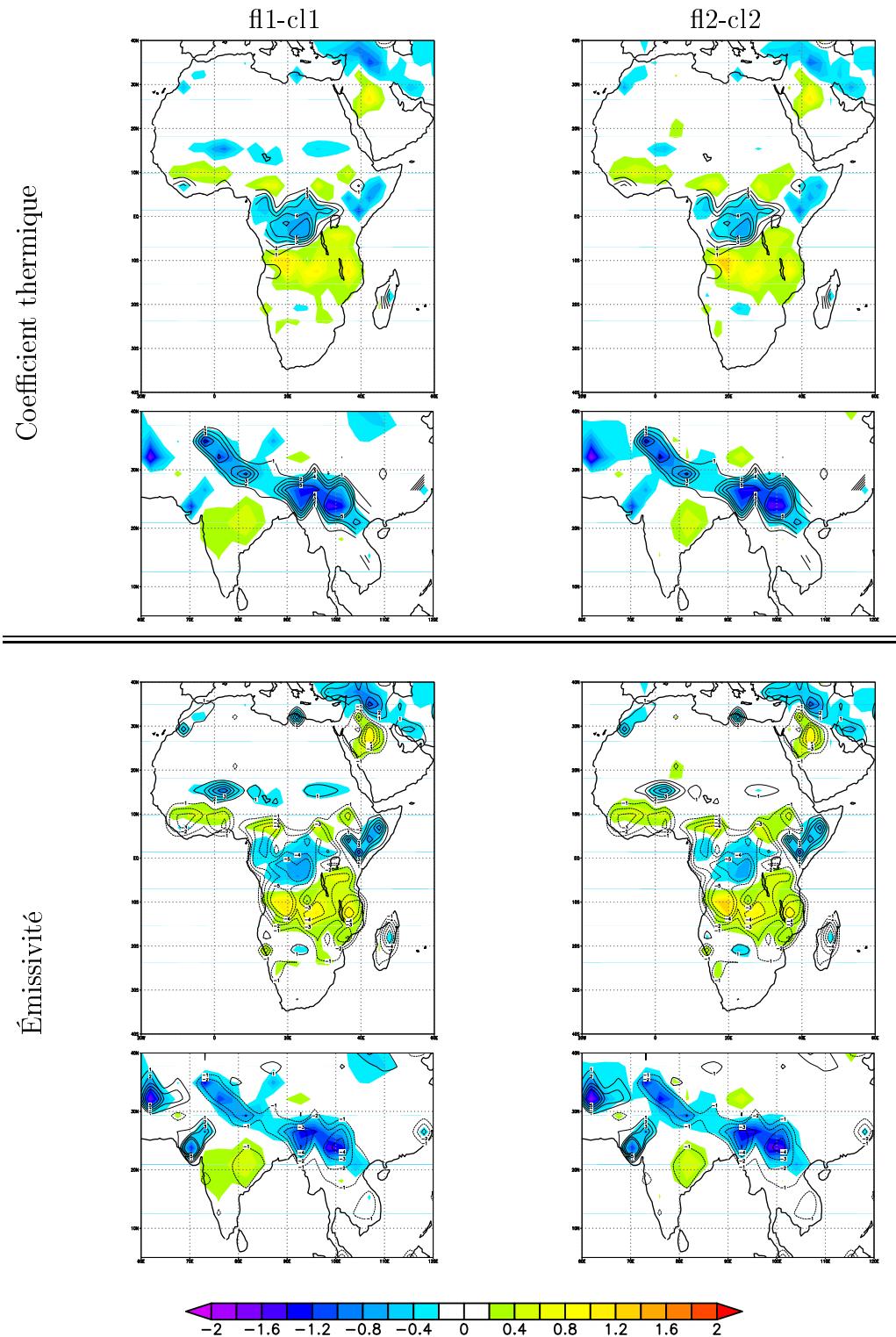


FIG. 3.10 - *Anomalies de température minimale en moyenne annuelle auxquelles on a superposé le changement du coefficient thermique de la végétation C_v (en haut) et le changement d'émissivité (en bas) pour les deux expériences de changement de végétation sous climat de 1980 (à gauche) et de 2050 (à droite). Pour le coefficient thermique, les isolignes sont espacées de $10^{-6} \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$, pour l'émissivité, elles ont espacées de 0.1%.*

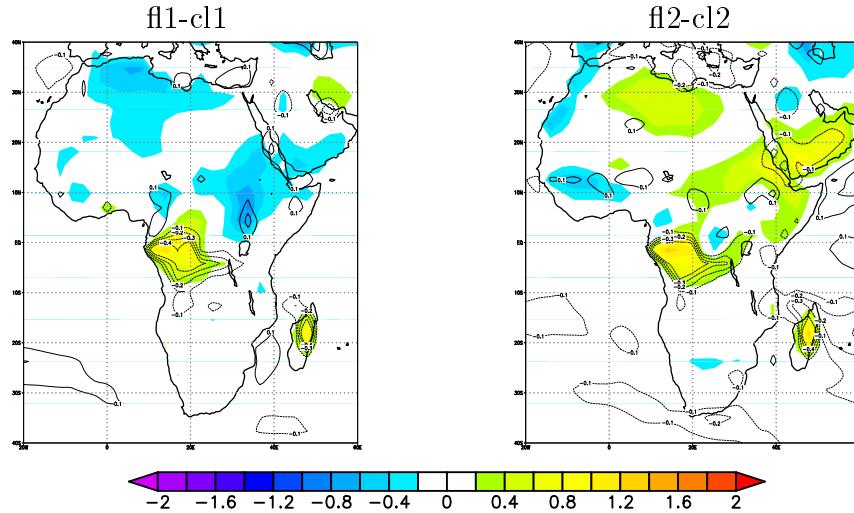


FIG. 3.11 - *Anomalies moyennes de température maximale en JAS auxquelles on a superposé l'anomalie moyenne d'évaporation sur la même période pour les deux expériences de changement de végétation (les isolignes sont espacées de 0.1mm.j^{-1}).*

placement de la forêt boréale par de la forêt de conifères et comme sur l'Europe extension des cultures aux dépens des forêts (de conifères ou boréales).

Sur ces régions, on observe un réchauffement en moyenne annuelle. Ce réchauffement est observé toute l'année mais est plus marqué en hiver qu'en été. Cette anomalie de température est corrélée à l'anomalie d'albédo en surface. Sur les figures 3.12 et 3.13, les anomalies d'albédo tracées sont les anomalies d'albédo effectif, c'est à dire prenant en compte l'impact de la neige sur l'albédo. En JJA, cette anomalie d'albédo est égale à celle imposée par le changement de végétation, en revanche, en DJF, l'anomalie est beaucoup plus importante (elle a plus que doublé) du fait de la présence de neige sur ces régions. Initialement, ces régions étaient surtout recouvertes de cultures qui sont facilement entièrement recouvertes par la neige et l'albédo de la végétation n'a alors pas beaucoup d'impact. En revanche, en remplaçant ces cultures par des forêts, la végétation masque la neige, et ceci d'autant plus que l'on se situe dans des régions où la couverture de neige n'est pas très importante. Il en résulte une forte diminution de l'albédo en hiver.

En été, on a aussi une réduction de l'albédo et une faible augmentation de la température, mais celle-ci n'est pas significative selon un test de Student à 90%. La corrélation spatiale entre les deux champs d'anomalies suggère toutefois que les deux phénomènes sont liés.

En DJF, on obtient des anomalies significatives (à plus de 95%) de la pression au niveau de la mer (carte 3.14). Pour les deux expériences, on observe une augmentation de la pression de plus de 1hPa sur l'Atlantique nord. Dans les deux simulations, on note

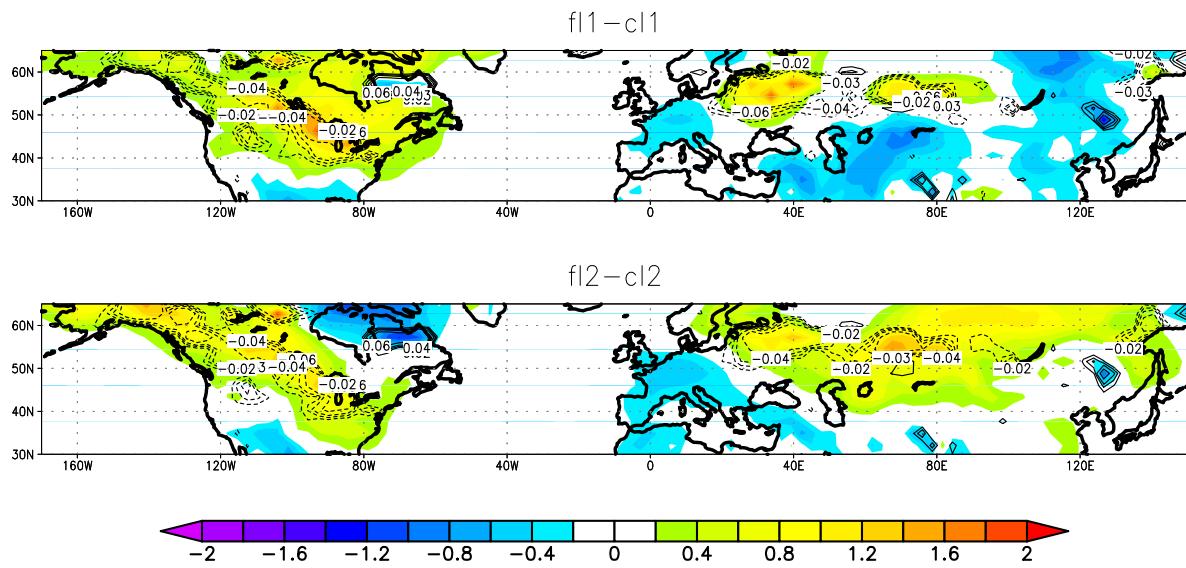


FIG. 3.12 - Anomalies de température moyenne en DJF auxquelles on a superposé l'anomalie d'albédo pour les deux expériences de changement de végétation (les isolignes sont espacées de 0.01).

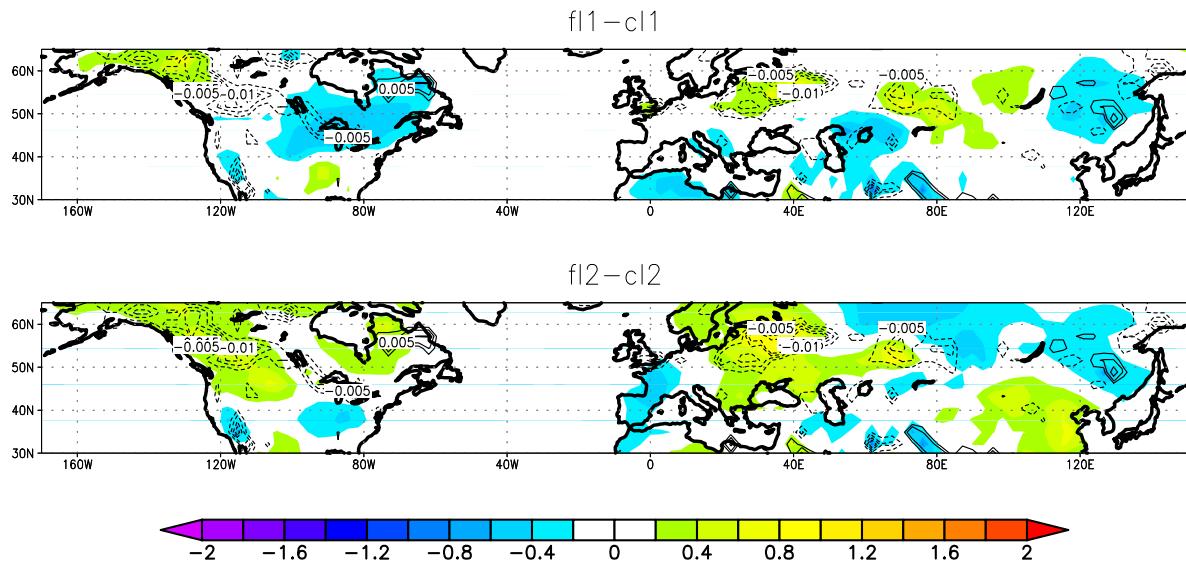


FIG. 3.13 - Idem figure 3.12 pour JJA avec les isolignes espacées de 0.005.

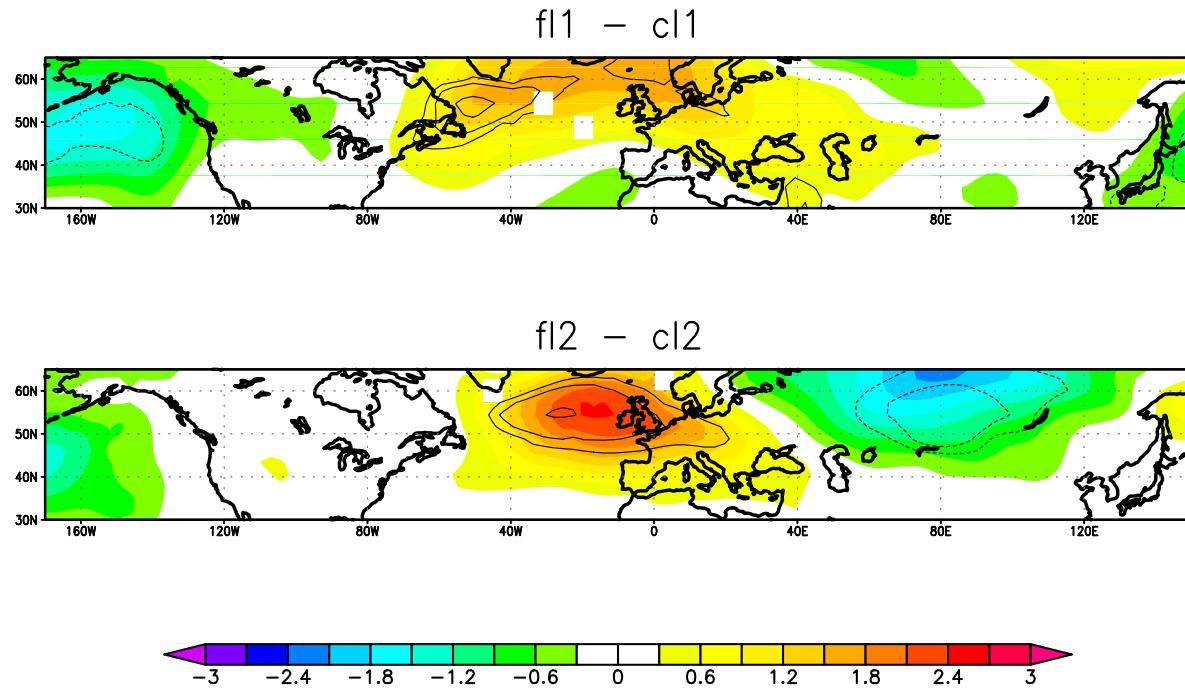


FIG. 3.14 - Anomalies de la pression au niveau de la mer en hPa pour les deux expériences de changement de végétation. Les isolignes indiquent les anomalies significatives selon un test de Student à 90%, 95% et 99%.

aussi une réduction du flux d'ouest vers 300hPa (carte 3.15). Cet affaiblissement du jet d'ouest est observé sur la zone continentale de l'Amérique du Nord ainsi que sur l'océan Atlantique. Les zones d'anomalies significatives ne sont toutefois pas tout à fait au même endroit pour les deux simulations. Le dipôle d'anomalies reflète un décalage vers le nord du noyau du jet. ? (?), dans une expérience de déforestation des régions boréales, avaient eux aussi suggéré que des modifications des conditions de surface aux moyennes et hautes latitudes pouvaient modifier la dynamique des moyennes latitudes. Dans leur expérience, ils obtenaient des effets de même signe : une déforestation engendrait une intensification de la partie sud du jet Nord-Atlantique (notre expérience consiste elle plutôt à une reforestation et on obtient bien le signe inverse). Toutefois, les expériences menées ici et par ? (?) n'utilisent pas de modèle d'océan ; les changements de la dynamique atmosphérique au dessus des océans sont donc peu fiables puisqu'ils ne prennent pas en compte une éventuelle rétroaction de l'océan.

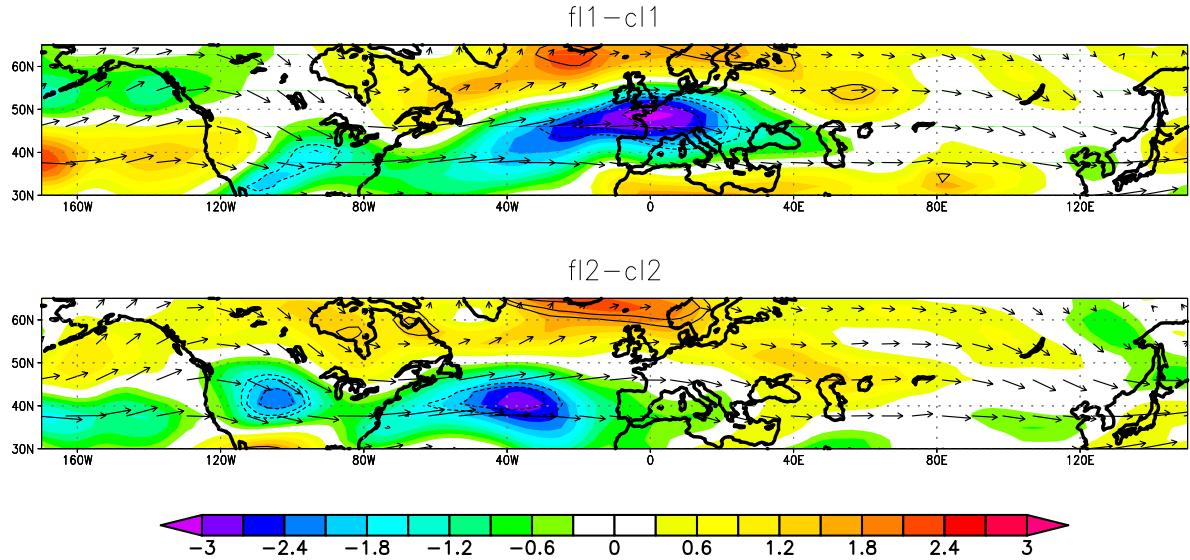


FIG. 3.15 - Anomalies de la norme du vent à 300hPa pour les deux expériences de changement de végétation. Les isolignes indiquent les anomalies significatives selon un test de Student à 90%, 95% et 99%. Les vecteurs indiquent le vent de l'expérience de contrôle (respectivement $CL1$ et $CL2$) dans chaque cas.

3.3.4 Synthèse

Les expériences réalisées ont permis de quantifier l’impact des changements de végétation relativement à l’impact des changements de concentration en GHGs pour un scénario B2 d’évolution sur le XXI^{ème} siècle. Les résultats obtenus montrent bien que l’impact des changements de végétation est du second ordre. On rappelle que l’on avait pourtant choisi la période d’analyse pour maximiser les changements de végétation par rapport à l’augmentation des concentrations en GHGs. Toutefois, les changements de végétation ont des effets positifs ou négatifs selon les régions et les transitions prévues. Ces impacts peuvent ainsi tout de même localement atteindre 30% de l’amplitude du changement climatique dû aux GHGs.

L’impact sur la température moyenne annuelle est assez faible mais il est similaire quel que soit le climat de contrôle. En revanche, les impacts saisonniers sont plus conséquents et dépendent plus du climat de contrôle. Les changements de végétation sont avant tout des phénomènes de petite échelle. Par ailleurs chaque type de transition a son propre impact sur le climat local, résultat de la combinaison des modifications de tous les paramètres de surface.

Les impacts sur les précipitations sont plus difficilement détectables. On ne distingue par ailleurs pas de similarité entre les deux simulations (sous climat de 1980 et de 2050). Deux raisons peuvent être invoquées : d'une part, l'impact sur les précipitations dépend beaucoup de la circulation atmosphérique de la simulation de contrôle, d'autre part les impacts sont trop faibles par rapport à la variabilité des précipitations, pour être correctement détectés.

Dans ces simulations, nous avons analysé la réponse du modèle atmosphérique à des changements de végétation mais nous n'avons pas pris en compte une éventuelle rétroaction de l'océan. L'étude de ? (?) a montré que l'océan pouvait jouer un rôle et modifier ainsi la réponse atmosphérique à des changements de végétation continentale. Dans notre expérience, il semble que les changements de la dynamique aux moyennes latitudes concernent aussi les régions océaniques. On ne peut ainsi exclure que l'océan pourrait jouer une rôle dans de telles simulations.

Chapitre 4

Expériences de déforestation tropicale massive dans AOG

4.1 Introduction

4.1.1 Motivation de l'étude

Dans le chapitre précédent, des expériences de changements de végétation dits réalistes ont été effectuées avec le modèle atmosphérique ARPEGE-Climat incluant le modèle de surface ISBA. Bien que réalisées avec un forçage océanique climatologique, c'est-à-dire sans variabilité interanuelle, la détection du signal induit par ces changements de végétation s'est révélée assez ardue. Par rapport à d'autres études (?; ?; ?; ?), il semble que le système ARPEGE-Climat/ISBA ait une faible sensibilité au changement de la couverture végétale. Toutefois, les changements imposés étant très différents, il est difficile d'attribuer les différences uniquement à la sensibilité des modèles utilisés.

Par ailleurs, les changements de carte de végétation ont été introduits dans le modèle atmosphérique seul, non couplé au modèle d'océan comme il devra l'être lors de simulations scénarios climatiques du XXI^{ème} siècle. Le modèle couplé océan-atmosphère est un système différent : d'une part, parce que le climat simulé est spécifique ; d'autre part, parce que l'océan peut interagir avec les modifications de la circulation atmosphérique et ainsi modifier la réponse du système climatique à des changements de couverture végétale.

Des expériences plus académiques de déforestation tropicale massive sont présentées ici dans le but de répondre aux questions laissées en suspens par l'étude précédente. De telles expériences ont été réalisées avec un grand nombre de modèles (?; ?; ?; ?; ?; ?) mais jamais avec ARPEGE-Climat. Ces nouvelles expériences permettent ainsi de comparer la

sensibilité de notre modèle couplé biosphère-atmosphère à celle d'autres modèles du même type. D'autre part, des simulations de déforestation sont réalisées avec ARPEGE-Climat seul et avec le modèle océan-atmosphère AOG. Cela permet ainsi d'évaluer si la réponse océanique peut induire une rétroaction significative sur la réponse de l'atmosphère à ces changements de végétation.

4.1.2 Description des simulations réalisées

Pour ces expériences, la carte de végétation utilisée dans les simulations de contrôle est la carte simulée par IMAGE2.2 pour 1980. C'est ainsi la même carte que celle utilisée dans la simulation de référence pour les expériences de changements réalistes de végétation présentées au chapitre précédent. Pour les simulations de déforestation, les types forêt tropicale et arbustes tropicaux sont remplacés par le type prairie de la classification IMAGE2.2. Trois régions sont ainsi concernées par la déforestation : l'Amazonie, l'Afrique équatoriale et l'Asie du sud-est (essentiellement l'Indonésie).

Un ensemble de 4 paires de simulations a été réalisé (chaque paire étant constituée d'une simulation de contrôle et d'une simulation déforestée) :

- ▶ FCL et FDF : expériences avec le modèle ARPEGE-Climat seul et des températures de surface de la mer (TSMs) prescrites. Il a été choisi d'utiliser des TSMs observées (?) avec un signal interannuel afin de se placer dans le même cadre de variabilité qu'avec un modèle d'océan. Ces deux simulations ont une durée de 30 ans et utilisent les TSMs de la période 1970-1999.
- ▶ CCTL et CDEF : expériences avec le modèle couplé océan-atmosphère ARPEGE/-OPA. Ces deux simulations ont une durée de 25 ans mais seules les 20 dernières années sont analysées.
- ▶ FCTL et FDEF : expériences avec le modèle ARPEGE-Climat seul et les TSMs provenant de la simulation CCTL. Ces expériences couvrent les 20 dernières années de la simulation CCTL. Comme le climat simulé par le modèle couplé est assez différent de celui simulé par le modèle atmosphérique seul forcé par des TSMs observées, les différences d'impact obtenues entre FDF et CDEF peuvent être dues soit au climat de contrôle différent soit au couplage avec le modèle d'océan. Ces nouvelles simulations permettent de mieux déterminer l'impact relatif des deux facteurs.
- ▶ CCTZ et CDEZ : expériences similaires à CDEF et CCTL mais avec correction d'une erreur dans la prescription de la longueur de rugosité de la végétation. Cette erreur est présente dans toutes les autres simulations et seule l'expérience en mode couplé est refaite dans le but de déterminer l'importance de cette erreur dans les simulations précédentes.

Cette étude a fait l'objet de deux publications intitulées «Tropical deforestation and climate variability» et «Climate sensitivity to tropical land surface changes with coupled versus prescribed SSTs», jointes respectivement en annexes E et F. Le premier article s'attache à analyser la réponse d'ARPEGE-Climat à la déforestation tropicale et à la comparer à des études similaires. Le deuxième article s'intéresse à l'influence du couplage océanique dans de telles simulations. Les deux parties suivantes de ce chapitre proposent un résumé des principaux résultats présentés dans chacune des publications.

4.2 Simulations avec le modèle atmosphérique seul

4.2.1 Impacts locaux sur le climat moyen

La réponse locale à la déforestation simulée par le modèle ARPEGE-Climat/ISBA est comparable à celle simulée par d'autres modèles de même complexité. En particulier, la comparaison avec les études de ? (?) et ? (?) montre que la sensibilité de notre modèle est plutôt faible. Cette faible sensibilité s'explique essentiellement par des phénomènes de compensation des impacts classiques.

Ainsi, l'impact de la déforestation sur l'évaporation locale est plutôt faible. L'évapotranspiration est nettement réduite, mais l'évaporation du sol nu augmente du fait de la diminution de la couverture végétale. L'effet de compensation est réduit à la saison sèche, quand il y a un fort stress hydrique. A cette période l'évaporation du sol nu ne peut augmenter et on observe une plus nette réduction de l'évaporation totale.

De même pour les températures, la température maximale augmente à la saison sèche quand l'évaporation est effectivement réduite, tandis que la température minimale est fortement réduite toute l'année. Cette diminution de température minimale semble due à la diminution d'inertie thermique du système sol+végétation induite par la déforestation. Cet effet d'inertie thermique n'est pas spécifié dans la plupart des autres expériences de déforestation publiées, et cet aspect du changement de végétation est une particularité de notre modèle. La réalité physique d'une diminution de l'inertie thermique ne semble pas à remettre en cause (cet effet a été mesuré par ? (?)). Toutefois, l'intensité de son impact dans ISBA est peut être surévaluée.

Pour l'Amazonie et l'Afrique, le modèle simule une diminution des précipitations locales, ce qui est conforme à la plupart des résultats des expériences de déforestation. En revanche, on n'observe pas de modification de la convergence d'humidité en moyenne sur chacune des régions. Pour l'Amazonie, ce résultat est un peu nuancé : il y a en fait diminution de la divergence d'humidité sur la partie sud du domaine qui correspond à une moindre advection d'humidité vers la partie nord. En résumé, l'évaporation est plus

réduite dans la partie sud du domaine, mais c'est dans le nord que l'impact sur les précipitations est le plus fort.

4.2.2 Impacts sur la variabilité journalière

Les expériences réalisées ayant une durée de trente ans, il a été possible de s'intéresser à la réponse à la déforestation en terme de variabilité journalière. La problématique est alors de savoir si, une fois déforestées, ces régions vont subir des épisodes de température particulièrement extrême ou une modification du régime des précipitations. Cet aspect de la réponse est particulièrement important pour déterminer la viabilité des cultures, voire des replantations après déforestation.

Pour les températures, on s'est intéressé à la fonction de répartition des données journalières par saison. On obtient une modification de la fonction de répartition des températures minimales à toutes les saisons. La distribution s'aplatit et le premier décile diminue de 2°C après déforestation (ce qui est plus que l'impact sur la moyenne). De même pour les températures maximales, on observe un décalage vers des plus fortes valeurs mais uniquement à la saison sèche.

Pour les précipitations, on n'observe pas de modification de la fonction de répartition. On observe plutôt une augmentation du nombre de jours sans précipitations, ainsi qu'une diminution de la moyenne des précipitations journalières, lorsqu'il pleut. Ceci semble dû à une stabilisation des basses couches de l'atmosphère.

4.2.3 Impacts sur la variabilité inter-annuelle

On s'est aussi intéressé à la variabilité inter-annuelle sur les régions déforestées. En particulier, l'Amazonie est une région soumise à l'influence de l'ENSO : durant les phases El Niño, l'est de l'Amazonie subit généralement une période de sécheresse. La corrélation entre les précipitations et l'indice ENSO est très correctement reproduite dans notre modèle.

Dans la simulation déforestée, la sécheresse induite par les événements El Niño est fortement renforcée et est associée à une très forte augmentation de la température moyenne sur l'Amazonie. Cet effet s'explique essentiellement par la diminution de la profondeur du réservoir en eau dans le sol (associée à la diminution de la taille des racines). Dans la simulation de contrôle, la forêt ne subit pratiquement pas de stress hydrique, même lors des périodes El Niño car elle peut puiser de l'eau très en profondeur. Après déforestation, le réservoir étant plus petit, les épisodes de sécheresse induisent plus rapidement une forte augmentation du stress hydrique. Ils sont donc accompagnés d'une diminution de l'éva-

poration plus nette et ainsi d'une augmentation importante de la température. On note que ces épisodes sont aussi plus rapidement résorbés : le réservoir d'eau étant plus petit, la saturation est plus vite atteinte.

Ces résultats sont présentés plus en détail dans l'article joint en annexe E.

4.3 Simulations avec le modèle couplé océan-atmosphère

4.3.1 Impacts locaux

Le climat simulé par le modèle couplé est assez différent de celui du modèle forcé utilisant des TSMs observées. En particulier, sur l'Amazonie, le modèle couplé simule un climat trop chaud et sec. Pour les deux autres régions déforestées, le climat est plus similaire. La simulation atmosphérique utilisant les TSMs simulées par le modèle d'océan reproduit bien, elle, le climat du modèle couplé.

L'impact de la déforestation en moyenne annuelle est très similaire quel que soit le protocole expérimental utilisé. Les grandes caractéristiques de la réponse sont bien reproduites. La simulation CDEZ simule, elle aussi, un impact cohérent mais amplifié du fait de la plus forte réduction de la longueur de rugosité. On note une première exception à ce constat : l'impact sur les précipitations localement sur l'Afrique semble moins robuste, sans toutefois être statistiquement différent.

L'analyse de l'impact de la déforestation sur le cycle annuel présente moins de cohérence entre les différentes simulations. La saisonnalité des impacts est, elle, plus dépendante du climat de contrôle. La simulation FDEF montre bien que les impacts sont plus distincts entre deux simulations dont le climat de contrôle est différent qu'entre deux simulations ayant le même climat mais incluant ou non le couplage océanique.

Une analyse du rapport signal/bruit est effectuée sur l'ensemble des simulations. On remarque tout d'abord que l'inclusion du modèle d'océan n'a pas notablement changé ce rapport, et donc que la durée de simulation nécessaire à la détection des impacts locaux ne change pas lorsque l'on utilise le modèle couplé. D'autre part, la détection de l'impact sur les flux de surface, qui dépendent directement des propriétés biophysiques de la végétation, est possible avec seulement quelques années de simulation. Les variables dépendant du bilan d'énergie en surface demandent des simulations un peu plus longues, tandis que les impacts sur la dynamique atmosphérique et les précipitations demandent des simulations de plusieurs décennies pour être statistiquement détectés. La durée de simulation nécessaire pour détecter statistiquement l'impact sur les précipitations est

ainsi proposée comme diagnostic de la force du couplage entre un modèle de surface et d'atmosphère.

4.3.2 Impacts non locaux

Dans les simulations couplées, on observe des changements de TSMs significatifs au moins dans les tropiques. Ces changements de température peuvent s'étendre aux quelques premières centaines de mètres de l'océan et sont qualitativement similaires dans les deux simulations couplées (avant et après correction de la longueur de rugosité). Toutefois, la simulation CDEZ, pour laquelle l'impact local est plus fort, ne présente pas des impacts dans l'océan plus importants.

D'autre part, il est difficile de détecter la cause de ces changements ainsi que leurs conséquences sur la circulation atmosphérique. On remarque ainsi que les impacts non locaux sur les précipitations sont différents d'une simulation à l'autre, suggérant une rétroaction de l'océan. Toutefois, l'absence de cohérence des simulations couplées sur ce point ne permet pas de confirmer une telle analyse.

Les résultats de cette étude en mode couplé sont présentés en détail dans l'article joint en annexe F.

4.4 Conclusion

Cette étude a ainsi montré que notre modèle ARPEGE-Climat/ISBA avait plutôt une sensibilité à la déforestation tropicale assez faible. Notre modèle simule des effets compensatoires qui ne semblent pas aussi importants dans les autres modèles. Une analyse de la variabilité haute fréquence a montré une modification de la distribution des températures minimales et maximales en faveur de l'augmentation des extrêmes. D'autre part, la diminution de la taille des réservoirs induit une intensification de la réponse à des épisodes de sécheresse.

L'inclusion du modèle d'océan ne détériore pas le rapport signal/bruit de telle sorte que l'on n'est pas obligé d'allonger la durée des simulations pour obtenir des résultats significatifs pour les impacts atmosphériques locaux (cette conclusion ne peut concerner la réponse océanique qui peut être différente du fait de la variabilité basse fréquence). Suite à la déforestation, on observe des modifications de la température de l'océan en surface et dans la couche de mélange, toutefois, il n'a pas été possible de détecter de possibles rétroactions de ces changements de température de l'océan sur l'atmosphère. Par ailleurs la simulation complémentaire CDEZ, pour laquelle le changement de longueur de rugosité

est plus important, ne présente pas d'impacts non locaux plus importants. Elle ne semble pas remettre en cause les résultats obtenus à partir des expériences contenant l'erreur de prescription de la longueur de rugosité. Au contraire, bien des aspects de la réponse observée dans cette dernière simulation concordent avec la simulation étudiée. On retient essentiellement de cette étude que l'océan ne joue pas un rôle majeur dans la réponse au changement de végétation. Cette conclusion est quelque peu différente de celle de l'étude de ? (?). Dans cette étude, les changements de végétation concernent les régions boréales et l'impact sur la température de l'océan est amplifié par la fonte de la glace de mer. Il est ainsi possible que l'océan soit plus sensible aux changements de végétation des hautes latitudes qu'à ceux des tropiques.

Chapitre 5

Scénario climatique du XXI^{ème} siècle avec AOG couplé à IMAGE2.2

Dans les chapitres précédents, nous avons d'abord testé la sensibilité d'IMAGE à différents forçages climatiques dont celui de AOG (ARPEGE/OPA/GELATO). Réciproquement, nous avons analysé la sensibilité d'ARPEGE-Climat à un changement de végétation produit par IMAGE. Enfin, nous avons estimé l'impact de l'utilisation de AOG plutôt que d'ARPEGE-Climat seul dans une expérience de sensibilité aux propriétés de surface. Ces différentes études nous ont permis de bien évaluer la sensibilité respective de chacun des deux modèles avant de procéder au couplage.

Ce dernier chapitre présente la mise en place du système couplé AOG/IMAGE2.2, ainsi qu'une première simulation scénario du XXI^{ème} siècle avec ce système. Les modèles étant maintenant couplés dynamiquement, nous cherchons à mettre en évidence d'éventuelles rétroactions entre les deux modèles. Plus particulièrement, ce système permet d'analyser d'éventuelles interactions entre le changement climatique induit par l'augmentation des concentrations en GHGs et l'utilisation des sols.

5.1 Description du couplage

IMAGE2.2 a été jusqu'à présent utilisé principalement pour fournir des scénario d'émission tels que ceux proposés par le GIEC. Il est ainsi capable de fournir tous les forçages anthropiques ainsi que la carte de végétation nécessaires à AOG. Les quatre types de forçages fournis sont :

- ▶ les concentrations globales des principaux gaz à effet de serre : CO₂, CH₄, N₂O, les CFCs, ainsi que la concentration totale en chlore.

- ▶ la charge en aérosols sulfatés sur la grille du modèle.
- ▶ la carte de végétation à la résolution de 0.5°x0.5°.
- ▶ les concentrations des espèces précurseurs de l'ozone.

Les deux modèles sont couplés de façon asynchrone au pas de temps de 5 ans (figure 5.1). Le système est complété par le modèle de photochimie MOBIDIC (?; ?). Celui-ci est aussi appelé tous les 5 ans pour déterminer les sources et puits d'ozone à partir de la climatologie des flux dans le modèle AOG et des concentrations en espèces précurseurs déterminées par IMAGE.

Par rapport aux simulations scénarios «classiques» déjà réalisées avec AOG, les concentrations en GHGs, en précurseurs de l'ozone ainsi que la charge en aérosols sulfatés sont calculées de façon interactive par IMAGE au lieu d'être déterminées par avance. D'autre part, la carte de végétation évolue sous l'action du changement climatique et de la pression anthropique alors qu'elle était fixée auparavant. Dans les simulations «classiques», les scénarios d'émissions utilisés sont ceux proposés par le GIEC (cf partie 1.1.4). Ces scénarios ont été établis par 6 modèles d'impacts intégrés différents dont IMAGE (voir tableau 1.2). La simulation couplée utilise ainsi des forçages de même type que ceux utilisés dans les simulations scénario climatique du XXI^{ème} siècle présentées par le GIEC.

De son côté, IMAGE utilise les sorties climatiques d'ARPEGE. Comme cela a été présenté au chapitre 2, seules la température de surface et les précipitations sont nécessaires à IMAGE. Pour ce couplage, ARPEGE fournit des anomalies de valeurs moyennes calculées sur les 30 dernières années de la simulation.

5.1.1 Modification de la carte de végétation

La carte de végétation utilisée par AOG est la carte de végétation réelle (cf chapitre 1) simulée par IMAGE. Cette carte représente l'utilisation des sols pour les cultures et les forêts, ainsi que l'évolution de la végétation naturelle sous l'action du climat. La carte de végétation est traduite en termes de paramètres pour la modélisation des échanges de l'atmosphère avec les surfaces continentales (cf chapitre 3).

Lors du changement de carte de végétation se pose le problème de l'adaptation de la taille du réservoir d'eau au nouveau type de végétation. En effet, lorsque la profondeur de sol est modifiée, conserver la quantité d'eau contenue dans le sol peut entraîner un assèchement relatif (ou une humidification) non réaliste du sol. Pour éviter un tel déséquilibre, on a choisi de conserver le degré de stress imposé à la végétation plutôt que la quantité d'eau contenue dans le sol. Cette méthode a cependant l'inconvénient de ne pas conserver totalement l'eau dans le modèle. Toutefois, le réservoir d'eau dans l'océan étant supposé infini, on peut considérer que l'eau ôtée des réservoirs de surface retourne instantanément

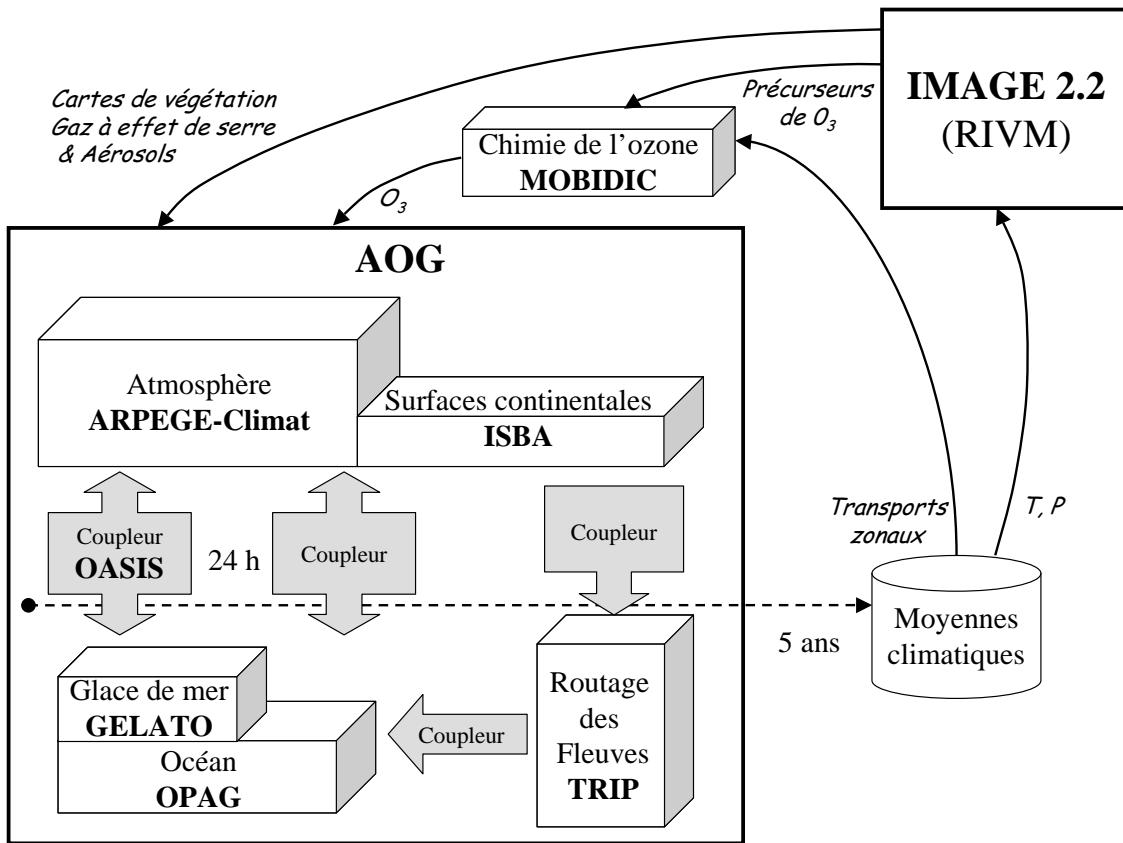


FIG. 5.1 - Schéma de fonctionnement du couplage entre AOG et IMAGE2.2

dans l'océan par ruissellement. Cette approche n'est pas aussi justifiée dans le cas où la capacité de réservoir d'eau augmente et où l'on rajoute de l'eau pour conserver le stress hydrique. Cette méthode reste une faiblesse du système mis en place. Toutefois, nous avons vérifié que les changements de profondeur de sol, et donc de capacité du réservoir d'eau dans le sol, étaient faibles lors d'un changement de carte de végétation tous les 5 ans. Du fait de la plus faible résolution du modèle AOG par rapport à la carte de végétation, une maille subit seulement quelques transitions à chaque itération, le changement de la profondeur moyenne du sol sur la maille du MCG est alors assez faible.

Au cours de la simulation réalisée, à chaque changement de carte de végétation, la quantité d'eau «perdue» est ainsi toujours inférieure à 0.2% de la quantité totale d'eau contenue dans le sol.

5.1.2 Modification de la charge des aérosols sulfatés

Le modèle IMAGE simule les émissions d'aérosols sulfatés dues aux industries et à l'utilisation des sols régionalement, ainsi que les émissions globales sur les océans. Le modèle ARPEGE-Climat inclut une paramétrisation de l'effet direct et du premier effet indirect des aérosols dans le schéma radiatif. La paramétrisation du premier effet indirect est dérivée des travaux de ? (?) et nécessite de connaître la répartition géographique de la charge en aérosols sulfatés. Comme nous ne disposons pas d'un modèle de transport des aérosols, nous avons relié de façon empirique les émissions simulées par IMAGE à la charge en aérosol nécessaire à ARPEGE.

Nous avons utilisé comme cartes de référence les cartes historiques produites par ? (?) avec le modèle LMDZ. Les émissions d'aérosols sulfatés marins sont globales et constantes dans les scénarios IMAGE, on leur associe la charge en aérosols sulfatés d'origine naturelle déterminée par ?. Pour les émissions d'origine anthropique, la carte de référence est celle proposée par ? pour la période 1970-1990. IMAGE produit des émissions pour chacune de ses 17 régions (voir Annexe C). La charge de référence est alors modulée régionalement suivant l'évolution locale des émissions au cours du XXI^{ème} siècle, en veillant à conserver une charge totale proportionnelle aux émissions totales.

5.1.3 Caractéristiques de la simulation réalisée

Pour la première réalisation d'une simulation du XXI^{ème} siècle couplée entre AOG et IMAGE, il a été choisi de suivre un scénario A2. Compte tenu de la faible sensibilité de notre modèle à des changements réalistes de la végétation, le scénario pour lequel les changements de végétation sont les plus importants a été choisi. En particulier, c'est le

scénario pour lequel la déforestation tropicale est maximale, y compris sur l'Amazonie. D'autre part, un scénario A2 (cf partie 1.1.4), nommé SA2, a déjà été réalisé avec AOG et pourra jouer le rôle de simulation de référence. Une autre simulation scénario de type SRES B2 sera aussi présentée pour certaines comparaisons, elle est nommée SB2.

On utilise la version 3 d'ARPEGE-Climat, comme pour les expériences de déforestation massive, mais on étend le nombre de niveaux verticaux à 45, pour les besoins du modèle de chimie hétérogène MOBIDIC.

Le modèle IMAGE simule l'évolution de la végétation à partir de 1970, mais ne prend en compte la simulation climatique de AOG qu'à partir de 1995. La simulation de AOG débute ainsi en 1970 en prenant en compte les cartes de végétation simulées par IMAGE mais le couplage n'est vraiment mis en place qu'à partir de l'année 1995. La simulation couplée IMAGE/AOG est appelée IMB.

5.2 Simulation du climat dans AOG

5.2.1 Forçages calculés par IMAGE

Concentrations en gaz à effet de serre

Le scénario SA2 servant de référence utilisait le scénario d'émission «marqueur» SRES A2. Ce scénario a été réalisé avec le modèle d'impacts intégré ASF (Sankovski *et al.*, 2000). Les concentrations en gaz à effet de serre simulées par IMAGE couplé à AOG sont assez proches de celles simulées par ASF (figure 5.2). La concentration en CO₂ est un peu plus importante (environ 50 ppm) en fin du XXI^e siècle avec IMAGE. Les scénario d'émissions de N₂O et CH₄ sont aussi très similaires. CFC12EQ représente une concentration équivalente en CFC12, prenant en compte toutes les autres espèces de chloro-fluorocarbones (autres que CFC11). La différence obtenue vient essentiellement du fait que plus d'espèces sont prises en compte dans le cas du scénario IMB (toutes les espèces chlorées simulées par IMAGE sont prises en compte et le nombre d'espèces simulées par IMAGE est plus important que le nombre d'espèces qui étaient pris en compte dans les scénarios précédemment réalisés au CNRM).

Charge en aérosols

Pour les aérosols sulfatés, les scénarios d'émissions de SA2 et d'IMAGE2.2 sont assez différents (figure 5.3). Avec IMAGE, l'augmentation des émissions est beaucoup plus lente et ne décroît qu'après 2070. Dans SA2, l'augmentation des émissions est plus rapide et

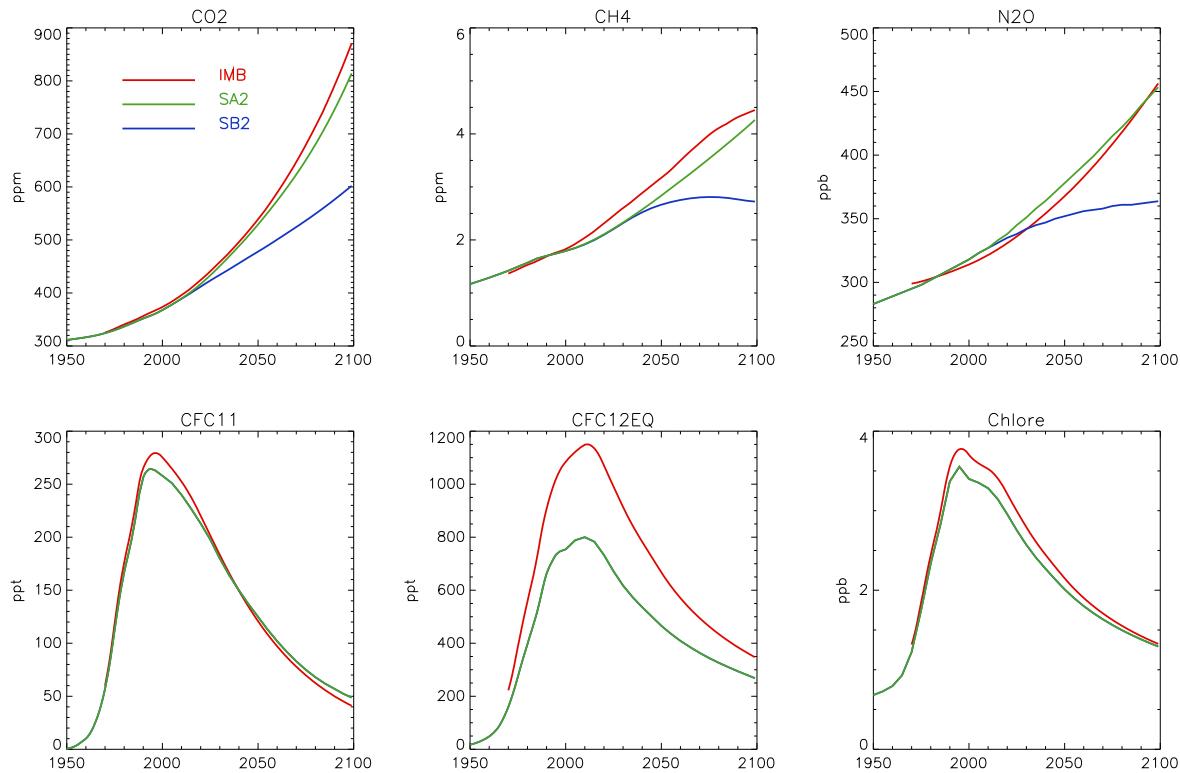


FIG. 5.2 - Concentrations en gaz à effet de serre pour les simulations SA2, et IMB (de type A2) et la simulation SB2 (de type B2)

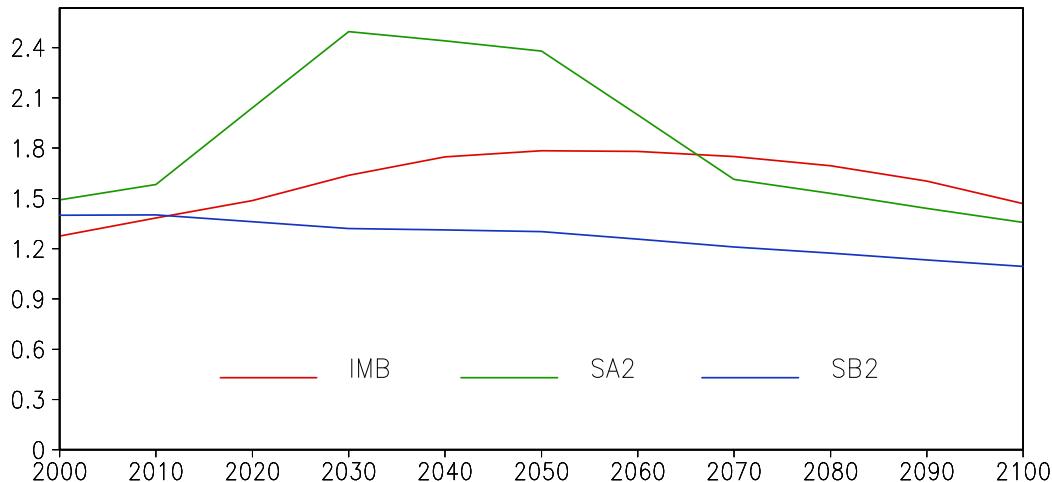


FIG. 5.3 - Charge globale moyenne en aérosols sulfatés en mg de S.m^{-2} pour les simulations IMB, SA2 et SB2.

atteint son maximum vers 2030. Bien que basée sur le même scénario SRES A2, l'évolution des émissions d'aérosols sulfatés est bien distincte. Le scénario produit par IMAGE ne semble pas plus irréaliste que celui choisi comme marqueur. D'après l'évolution récente des émissions, il semble que l'augmentation forte prévue au début du XXI^{ème} siècle dans le scénario marqueur soit un peu surévaluée. D'autre part, parmi les modèles intégrés utilisés pour établir les scénarios d'émission, d'autres modèles simulent une tendance analogue à IMAGE (voir ? (?)).

Lors de la simulation IMB, une erreur s'est glissée dans le calcul de la répartition de la charge en aérosols sulfatés. La figure 5.4 montre la distribution de la charge qui a été utilisée lors de la simulation IMB, ainsi que celle qui aurait dû être appliquée sans cette erreur. On a tracé le logarithme de la charge car cela correspond mieux à la façon dont la paramétrisation des aérosols prend en compte cette charge. L'erreur a consisté à renverser les latitudes des régions d'émissions. Ainsi, les émissions ont continué à augmenter fortement sur l'hémisphère nord et à augmenter plus faiblement dans l'hémisphère sud contrairement au scénario d'émission produit par IMAGE. Cette erreur a pour conséquence d'obtenir un différentiel de réchauffement entre les deux hémisphères qui n'est pas tout à fait cohérent avec les simulations scénario déjà réalisées avec notre modèle. Toutefois, la méthode de calcul de la charge consistant uniquement à moduler la carte de la charge en aérosols initiale, la carte utilisée dans le scénario IMB conserve une distribution spatiale plutôt réaliste.

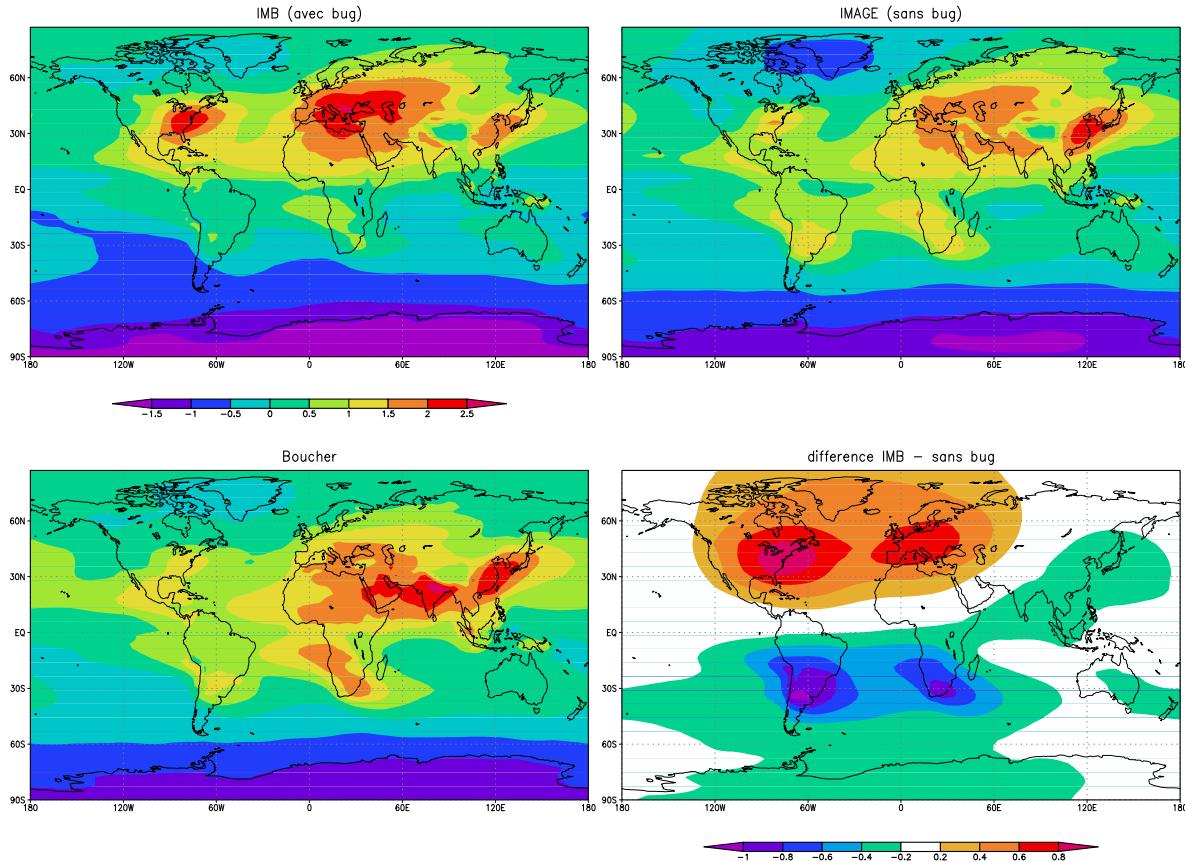


FIG. 5.4 - Logarithme de la répartition de la charge en aérosols sulfatés en 2050, dans la simulation IMB, telle qu'elle aurait dû être dans IMB sans bug, et d'après les projections de Boucher préparées pour le 4^{me} rapport du GIEC (voir <http://www-loa.univ-lille1.fr/~boucher/sres/>). La 4^{ème} carte montre la différence des logarithmes de la charge avec et sans le bug.

Propriétés de surface

L'utilisation du modèle IMAGE permet de faire évoluer la carte de végétation au cours de la simulation. La figure 5.5 montre les moyennes zonales des anomalies sur les paramètres de surface induites par les changements de végétation, ainsi que les anomalies qui seraient obtenues si on utilisait la carte de végétation naturelle. La végétation dite réelle est celle utilisée dans le couplage. Elle représente les changements de végétation naturelle et ceux dus à l'utilisation des sols. La carte de végétation naturelle ne représente que les changements de la végétation naturelle sous l'effet du changement de climat, sans utilisation des sols. Aux hautes latitudes, on observe essentiellement une diminution de l'albédo, due à un décalage vers le nord des zones de végétation. Les autres paramètres de la végétation sont peu modifiés. Au delà de 50°N, les changements de végétation réelle sont dus à la végétation naturelle. Dans les régions tempérées, les modifications appliquées aux paramètres de surface sont assez faibles. Dans ces régions, l'utilisation des sols a un effet contraire aux changements de la végétation naturelle. Il en résulte peu de changement en moyenne pour la végétation réelle. Aux tropiques, les propriétés de la végétation sont plus nettement modifiées. L'albédo augmente de 1%, la longueur de rugosité de la végétation diminue de plus de 0.2m, l'indice foliaire diminue de 0.35m.m^{-2} et la profondeur de sol diminue de plus de 1m en moyenne zonale. Ces changements sont dus principalement à l'extension des terres cultivées et vont à l'encontre des changements que subirait la végétation naturelle. Il est à noter que, même si les changements simulés pour la végétation réelle sont plus importants que pour la végétation naturelle, les anomalies zonales des propriétés de surface restent faibles. Les changements introduits dans la simulation sont bien plus mesurés que ceux introduits lors des expériences de déforestation massive présentées au chapitre précédent.

5.2.2 Climat simulé

Lors de la simulation IMB, la configuration utilisée pour le modèle ARPEGE-Climat s'est révélée être en limite de stabilité numérique, en raison des vitesses maximales atteintes par les jets stratosphériques. Pour éviter ces problèmes numériques, il a été décidé de diminuer légèrement le pas de temps du modèle. Il était à l'origine de 1800s, et il a été réduit à 1350s à partir de l'année de simulation 2044. Si ce changement ne semblait pas, à première vue, avoir d'influence majeure sur le modèle, il s'est avéré que l'équilibre radiatif du modèle s'est trouvé brusquement modifié à partir de cette date. Le flux radiatif net en surface a augmenté brutalement de 3W.m^{-2} (figure 5.6). Cette rupture est particulièrement gênante dans une telle simulation de type transitoire. En particulier, elle modifie l'équilibre radiatif de l'océan et entraîne ensuite une dérive, le temps que la composante océanique se rééquilibre. L'évolution de la température globale ne montre pas

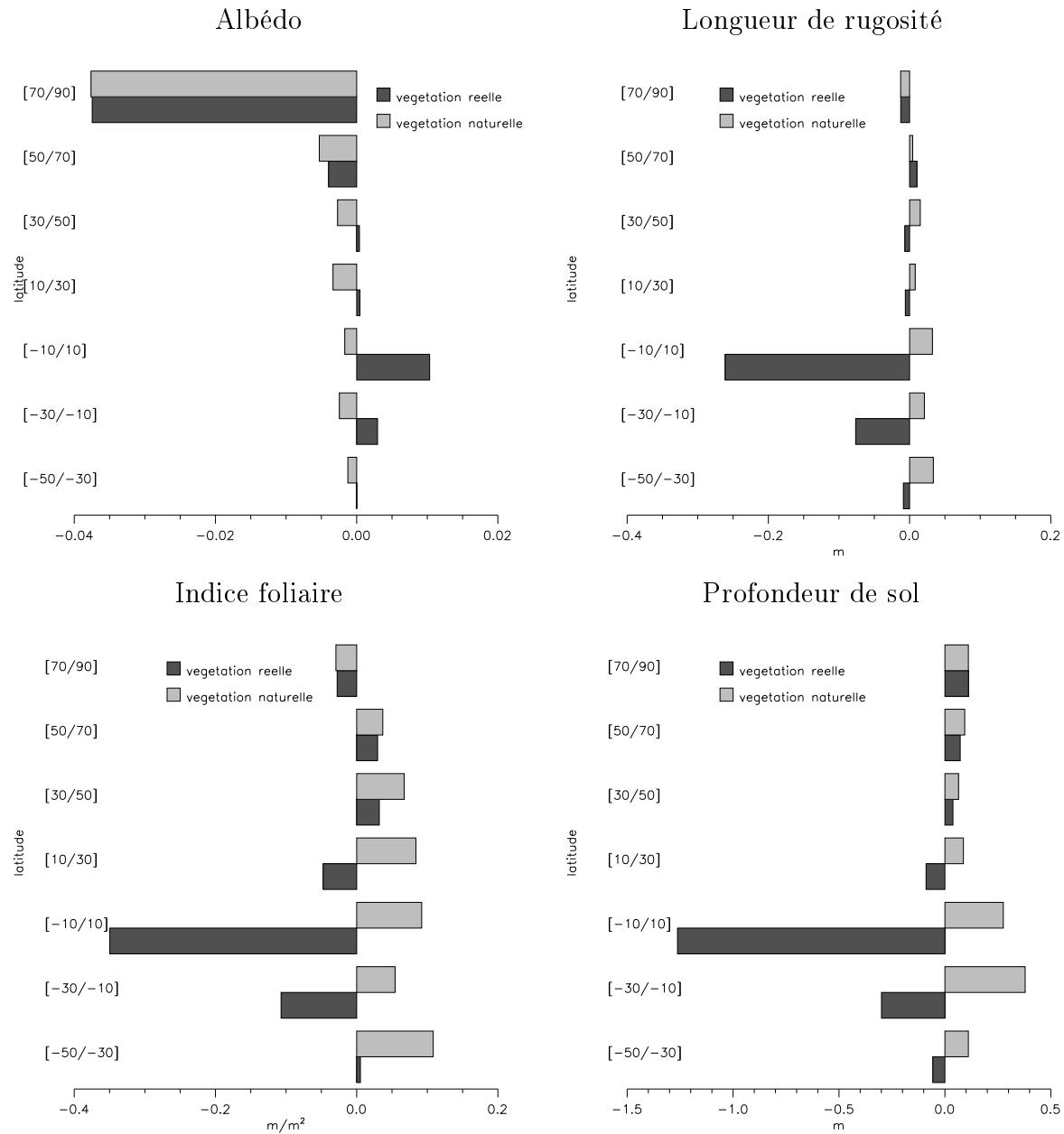


FIG. 5.5 - Anomalies zonales des propriétés de surface pour la période 2090-2099 par rapport à la période 1970-1979 pour la simulation IMB.

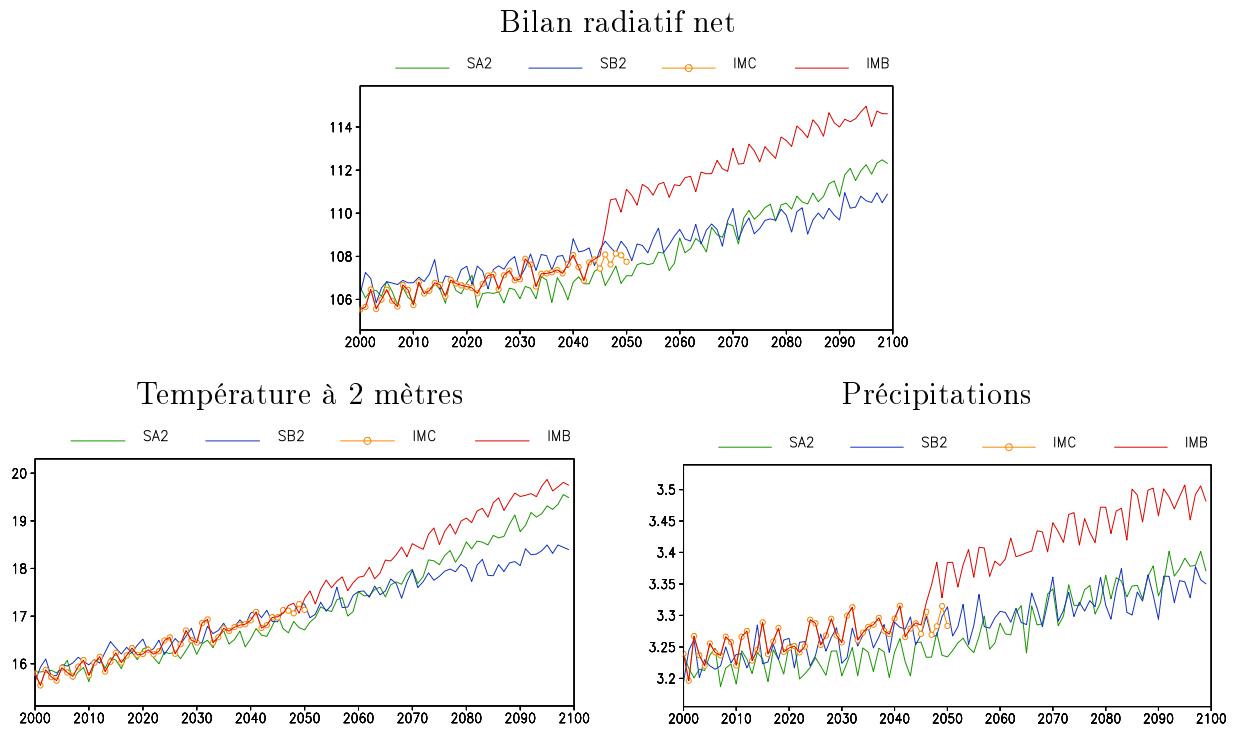


FIG. 5.6 - *Évolution de la moyenne globale annuelle du bilan radiatif net en surface, de la température à 2 mètres et des précipitations.*

cette rupture mais il est probable qu'il y ait une dérive progressive à partir de 2044. Pour les précipitations, on observe aussi cette rupture. Compte tenu du coût d'une telle simulation, ainsi que du temps nécessaire à sa réalisation, il a été décidé de ne pas la refaire immédiatement. En revanche, une simulation complémentaire de 7 ans, redémarrant en 2044 et se terminant en 2050, avec un pas de temps de 1800s a été produite. Elle est nommée IMC. Sur les graphiques, pour la simulation IMC avant 2044, on utilise les résultats de IMB (IMC n'est qu'un prolongement différent de IMB après 2044). La figure 5.6 montre nettement que cette simulation IMC ne produit pas la rupture obtenue dans IMB. La simulation IMC n'a pas été prolongée car l'erreur de prescription des aérosols sulfatés est présente et une nouvelle simulation totalement corrigée serait plus intéressante.

Si l'équilibre radiatif du modèle est assez fortement modifié à partir de 2044 dans la simulation IMB, l'impact sur l'évolution de la température des surfaces continentales semble rester assez faible. Les figures 5.7 et 5.8 montrent les moyennes glissantes sur 30 années de la température à 2 mètres et des précipitations sur les continents. Ces figures représentent ainsi le climat «vu» par le modèle IMAGE dans le couplage. Bien qu'il y ait probablement une dérive progressive de la température due à la rupture, on remarque que

pour la plupart des régions, la tendance au réchauffement en fin de XXI^{ème} siècle pour IMB est assez proche de celle de la simulation SA2.

Pour les précipitations, la rupture constatée sur les moyennes annuelles (figure 5.6) semble apparaître en moyenne sur 30 ans (figure 5.8). Elle est plus évidente sur les océans, la moyenne sur les continents semble augmenter moins brutalement. Que la modification de l'équilibre radiatif du modèle ait un impact plus important au dessus des océans semble bien s'expliquer : l'augmentation du bilan radiatif net augmente l'énergie absorbée par l'océan, on obtient ainsi une augmentation de l'évaporation sur les océans et une augmentation des précipitations. Toutefois, même si l'effet semble moins marqué sur les continents, on ne peut considérer que la rupture n'y a aucun impact. Les quelques années de IMC ne permettent pas de préjuger d'une évolution comparable, si l'on n'avait pas introduit de rupture. Les différences obtenues entre IMC et IMB sont toutefois plutôt faibles en regard de la variabilité basse fréquence du modèle.

Par ailleurs, on remarque le comportement singulier de la simulation IMB avant 2050 sur le Sahel. L'augmentation des précipitations s'interrompt plus tôt que dans les deux scénarios SA2 et SB2, pour diminuer légèrement ensuite. Sur cette région, la charge en aérosols sulfatés augmente jusqu'en 2060 pour la simulation IMB, jusque vers 2050 pour SA2 et diminue jusque vers 2030 puis augmente lentement dans SB2. Les forçages différents en aérosols sulfatés ne sont pas cohérents avec les tendances des précipitations, semblant indiquer que la différence de comportement de IMB n'est pas dû au forçage local des aérosols. De même, on n'observe pas de tendance cohérente sur les paramètres de surface liés à la végétation. Il se peut néanmoins que l'un des deux forçages joue un rôle mais par un effet non-local.

On observe aussi un comportement particulier sur le Nord de l'Amérique du Sud. Sur ce petit domaine, la simulation IMB simule une réduction des précipitations depuis 1980 alors que SA2 et SB2 simulent une augmentation jusque vers 2010-2020 puis on observe plutôt une stabilisation. Dans les expériences de déforestation massive, c'est aussi sur cette région que les précipitations étaient le plus réduites. Dans la simulation IMB, cette réduction des précipitations est aussi accompagnée d'une réduction de la quantité d'eau dans le sol (par diminution de la taille du réservoir) et de l'évaporation. Il est donc possible que cette différence de tendance sur les précipitations soit due au changement de végétation. Toutefois, on ne peut rejeter l'hypothèse que cette différence soit due à la différence du forçage en aérosols.

La température moyenne globale de la simulation IMB au début du XXI^{ème} siècle est un peu plus faible que celle des simulations SA2 et SB2 (figure 5.7). D'après des études préliminaires menées avec AOG, cette différence peut être attribuée à la nouvelle carte d'aérosols sulfatés utilisée. En effet, dans les simulations antérieures, seuls les aérosols

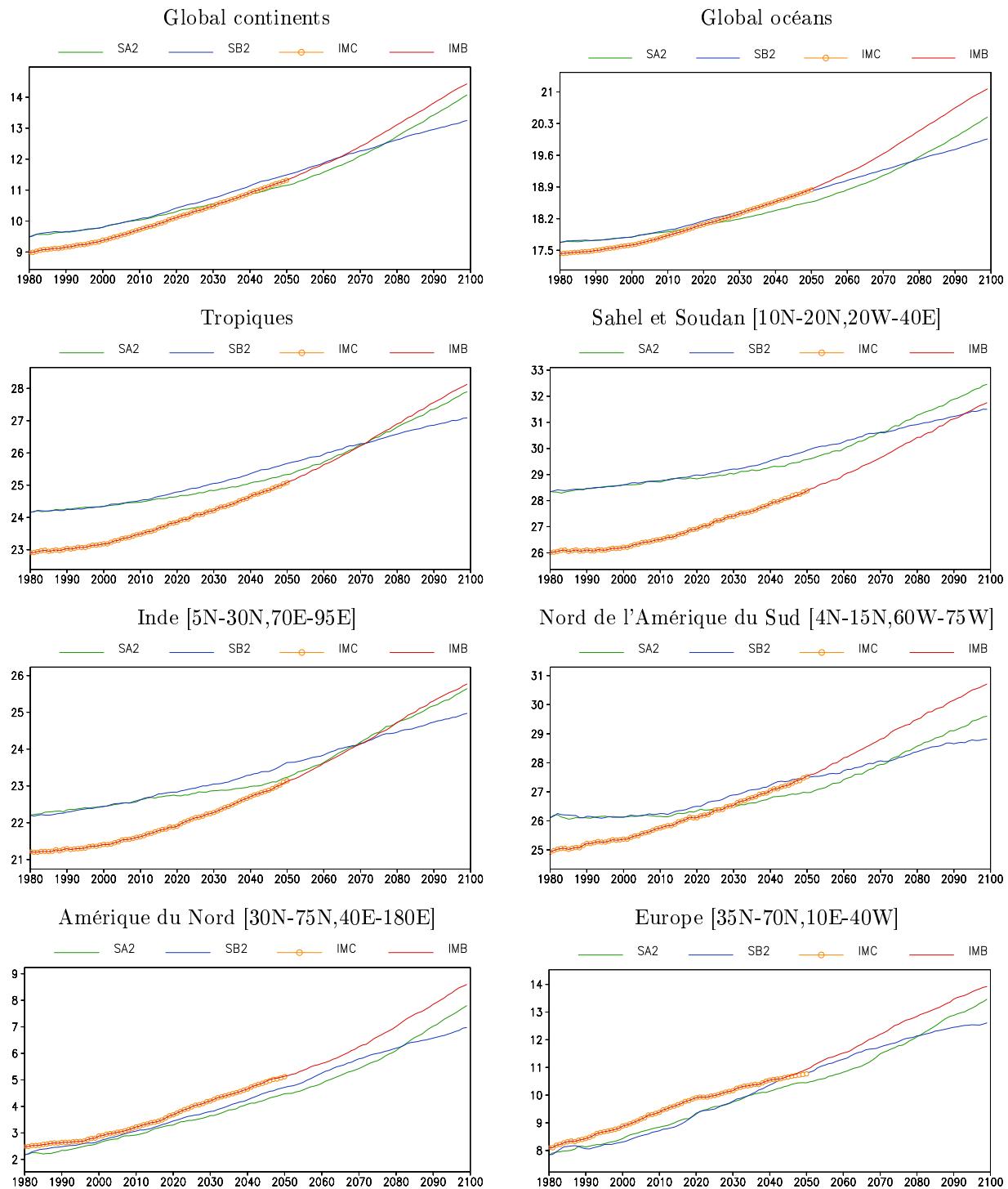
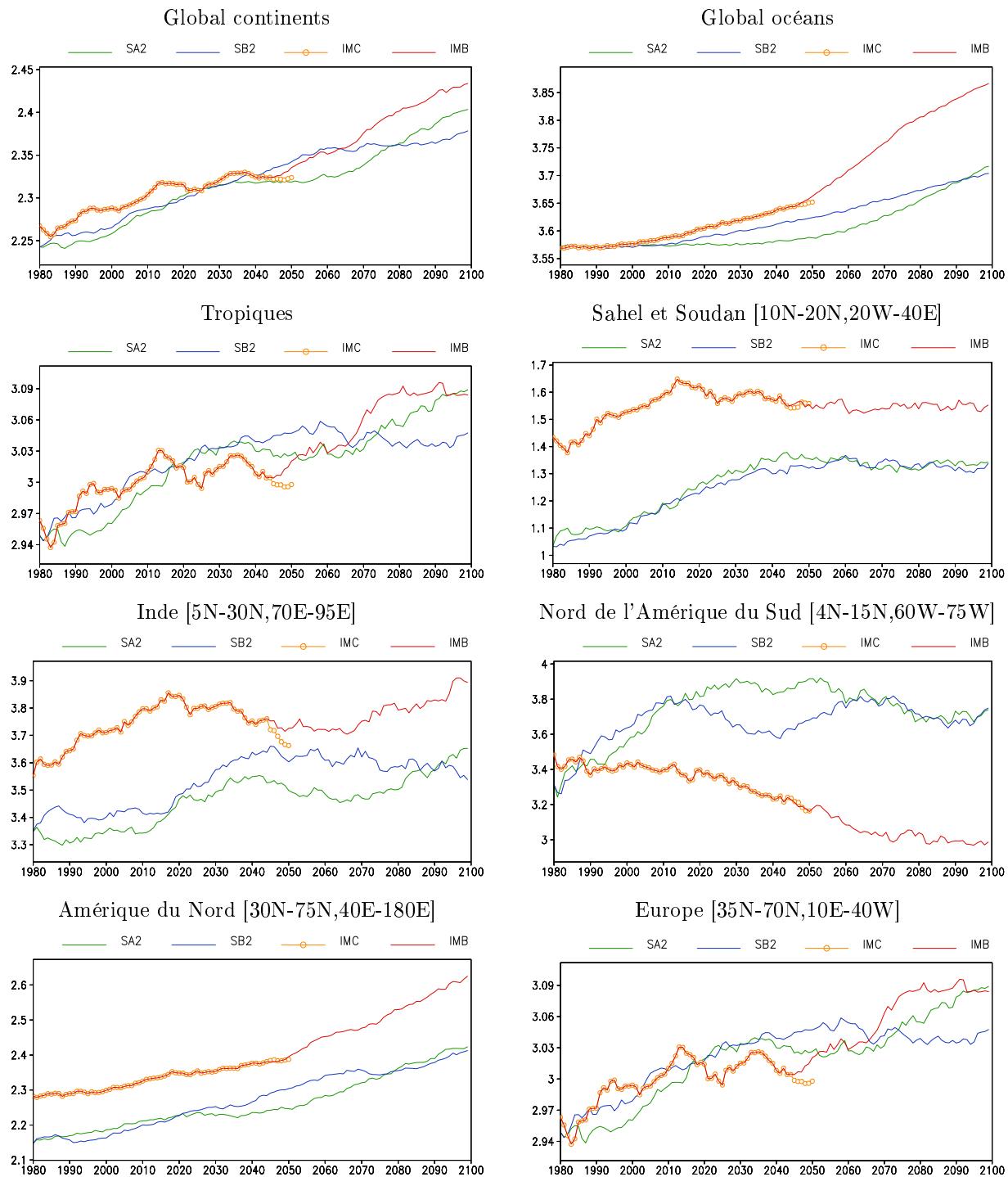


FIG. 5.7 - *Évolution de la température moyenne à 2 mètres sur les continents pour différents domaines (moyennes glissantes sur 30 ans) ainsi qu'en global sur les océans.*

FIG. 5.8 - *idem 5.7 pour les précipitations.*

sulfatés d'origine anthropique étaient pris en compte pour le premier effet indirect des aérosols. D'après les données de Boucher, les aérosols sulfatés d'origine naturelle représentent environ 30% de la charge totale. Dans la simulation IMB, les aérosols sulfatés d'origine naturelle sont pris en compte pour le calcul de l'effet indirect. Leurs émissions étant constantes dans IMAGE, on a ajouté la répartition des aérosols sulfatés naturels produite par Boucher à celle des aérosols d'origine anthropique. Ainsi, au XX^{ème} siècle, la charge en aérosols sulfatés est plus importante dans la simulation IMB que dans la simulation SA2, ce qui a pour conséquence de diminuer la température globale moyenne. D'autre part, l'augmentation de température en moyenne globale jusqu'en 2050 est plus importante dans la simulation IMB que dans la simulation SA2. Cette différence est elle aussi attribuée aux aérosols sulfatés. L'augmentation de charge totale étant moins importante que dans SA2, leur effet de refroidissement est moins important. Après 2050, l'augmentation de la concentration en CO₂ s'intensifie fortement, et on peut penser que l'effet relatif des aérosols devient moins important.

La répartition géographique du réchauffement (figure 5.9) est globalement assez similaire à celle obtenue pour la simulation SA2. Le minimum de réchauffement se situe sur l'océan Antarctique et le maximum en Arctique. Toutefois, on remarque que le réchauffement sur le nord de l'Amazonie est plus important que sur le reste du continent sud-américain, ce qui n'était pas observé dans SA2. De même, le réchauffement sur le sud de l'Afrique et sur l'Australie est comparable à celui observé sur le Sahara, alors que ces régions subissaient un réchauffement moindre dans la simulation SA2. Pour les précipitations, on remarque une augmentation nette des précipitations sur tout l'est de l'Afrique dans IMB tandis que dans SA2, on observe une augmentation au niveau de la bande sahélienne. Cette différence de motif, déjà observée en 2050, semble robuste. On retrouve aussi la diminution des précipitations sur le nord de l'Amérique du sud dans IMB comme vu précédemment sur la figure 5.7.

Compte tenu des problèmes rencontrés, il est difficile de conclure quand à l'impact des changements de végétation dans AOG. Les tendances des précipitations obtenues dans les régions tropicales semblent singulièrement différentes dans la simulation IMB et on note que ces différences sont observées avant la rupture. Malheureusement, la différence de comportement peut aussi bien être attribuée aux changements de végétation ou au forçage en aérosols sulfatés. On notera à ce stade que la difficulté d'attribution des différences serait identique dans une simulation où l'on n'aurait pas le problème de rupture.

Il aurait pu être préférable de s'en tenir à l'analyse de la simulation IMC jusqu'en 2050 ; toutefois, les changements de végétation sont très lents et l'analyse de la dynamique de la végétation sur une période de 50 années n'est pas très significative. D'autre part, au moins pour les températures, la modification du modèle a un impact global sur le climat, alors que l'on attend du couplage IMAGE-AOG un effet local.

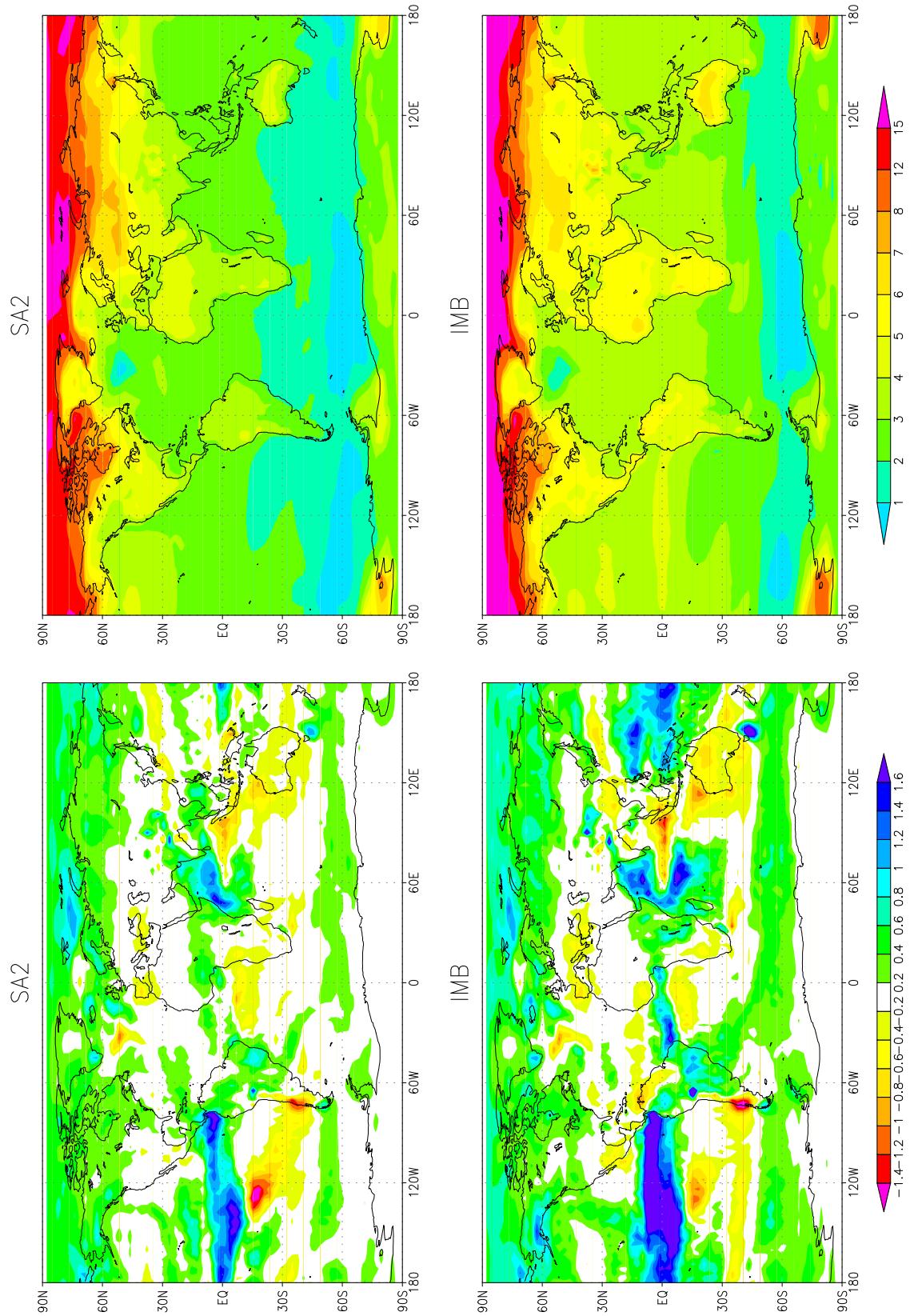


FIG. 5.9 - Anomalies annuelles de température à 2m (en haut) et de précipitations (en bas) pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1970-1999.

Nom de la simulation	Description
SCC	Pas de prise en compte du changement climatique par la végétation (naturelle et cultures)
No CO ₂	Pas de prise en compte du changement climatique et de GHGs par la végétation
AOG	Utilise la version IMAGE par défaut avec le motif de la simulation SA2, la sensibilité du module de climat de IMAGE est fixée à 2.5°C
AOG + TSM	IMAGE forcé par la simulation SA2 (pas d'utilisation du module de climat d'IMAGE) mais pas de couplage interactif
IMB	Simulation couplée AOG/IMAGE
IMB 1.5	Idem AOG mais avec le motif produit par IMB, et la sensibilité climatique d'IMAGE fixée à 1.5°C
IMB 4.5	Idem IMB 1.5 avec une sensibilité de 4.5°C

TAB. 5.1 - *Tableau récapitulatif des simulations IMAGE utilisées dans ce chapitre.*

5.3 Caractéristiques de la simulation IMAGE

Pour détecter d'éventuelles interactions non-linéaires et locales dans le système couplé IMAGE/AOG, il est plus aisé d'analyser les résultats de la simulation IMAGE. La simulation couplée IMB est comparée à diverses simulations IMAGE listées dans le tableau 5.1. Certaines de ces simulations ont déjà été présentées au chapitre 2. Deux nouvelles simulations sont ajoutées : IMB 1.5 et IMB 4.5, qui sont des simulations du modèle IMAGE dans sa version standard (i.e. le module climatique simple d'IMAGE est utilisé pour le calcul du climat), mais on utilise le motif produit par la simulation couplée IMB et on fixe la sensibilité du climat respectivement à 1.5° C et à 4.5° C. Ces deux valeurs ont été choisies pour couvrir une gamme un peu étendue de sensibilité. Il n'a malheureusement pas été possible de déterminer proprement la sensibilité de AOG. On note simplement que les résultats de IMB sont plus proches de ceux de IMB 4.5.

5.3.1 Évolution de la végétation

Étude globale

La carte de végétation obtenue pour l'expérience IMB en 2050 est comparée à celle simulée en utilisant le motif de la simulation SA2 (simulation appelée AOG). La carte de végétation naturelle (figure 5.10) reflète uniquement les changements dus à la modification du climat et à l'augmentation de la concentration en CO₂. D'une manière générale, les

changements obtenus dans la simulation IMB sont très ressemblants à ceux obtenus pour la simulation AOG. Partout, les limites des zones de végétation (écotones) sont modifiées de façon similaire. Dans les régions tropicales, l'extension du type savane boisée aux dépens de la savane est due principalement à l'augmentation de l'efficience de l'utilisation de l'eau. De même sur l'Afrique, le décalage vers le nord des types savane, arbustes et steppes aux portes du désert est similaire dans les deux simulations et attribué à l'augmentation de l'efficience de l'utilisation de l'eau. Aux hautes latitudes le modèle prévoit un déplacement vers le nord de la forêt boréale et de la toundra arborée. On remarque que ces déplacements sont un peu plus importants dans la simulation AOG que dans la simulation couplée. Cette différence semble due à un réchauffement un peu moins fort au nord de la Russie dans la simulation IMB.

Au nord de 50°N, les changements de végétation réelle (figure 5.11) sont les changements de végétation naturelle. Aux tropiques, les changements de végétation naturelle sont peu discernables. L'utilisation des terres est le facteur déterminant de la carte de végétation. Dans ces régions, les deux simulations semblent donner des résultats identiques.

Sud de l'Afrique

Une des rares différences qui se dégage est une moindre extension des cultures sur le sud-ouest de l'Afrique dans la simulation IMB. L'évolution de la surface des terres cultivées sur cette région (figure 5.12) montre que cette différence apparaît vers 2030. Celle-ci est due à une augmentation des productivités du maïs et des céréales tropicales à cette période. L'augmentation des productivités reflète l'apparition de conditions climatiques plus favorables pour ces cultures entre 2020 et 2050 dans la simulation IMB. En particulier, cette simulation prévoit une augmentation des précipitations en moyenne sur la région (figure 5.12). Cette tendance moyenne reflète surtout l'augmentation sur le nord-est de la région, tandis qu'il y a plutôt une diminution sur l'ouest. De ce fait, l'extension des cultures se fait préférentiellement sur l'est de la région et est moindre du fait de conditions plus favorables.

Cette différence s'estompe dans la deuxième moitié du siècle, et la surface des terres cultivées redevient équivalente en 2100. Cette convergence s'explique par un dépassement de la température optimale de croissance des cultures rapide dans IMB qui limite le bénéfice de l'augmentation des précipitations. On note ici que la réduction des surfaces cultivées en fin de siècle reflète une forte augmentation des productivités liée à l'utilisation de fertilisants.

L'extension des cultures est majoritairement fonction de l'évolution économique et démographique proposée par le scénario et dépend peu du climat simulé. Cet exemple montre le faible couplage qui existe entre l'évolution des surfaces cultivées et le climat.

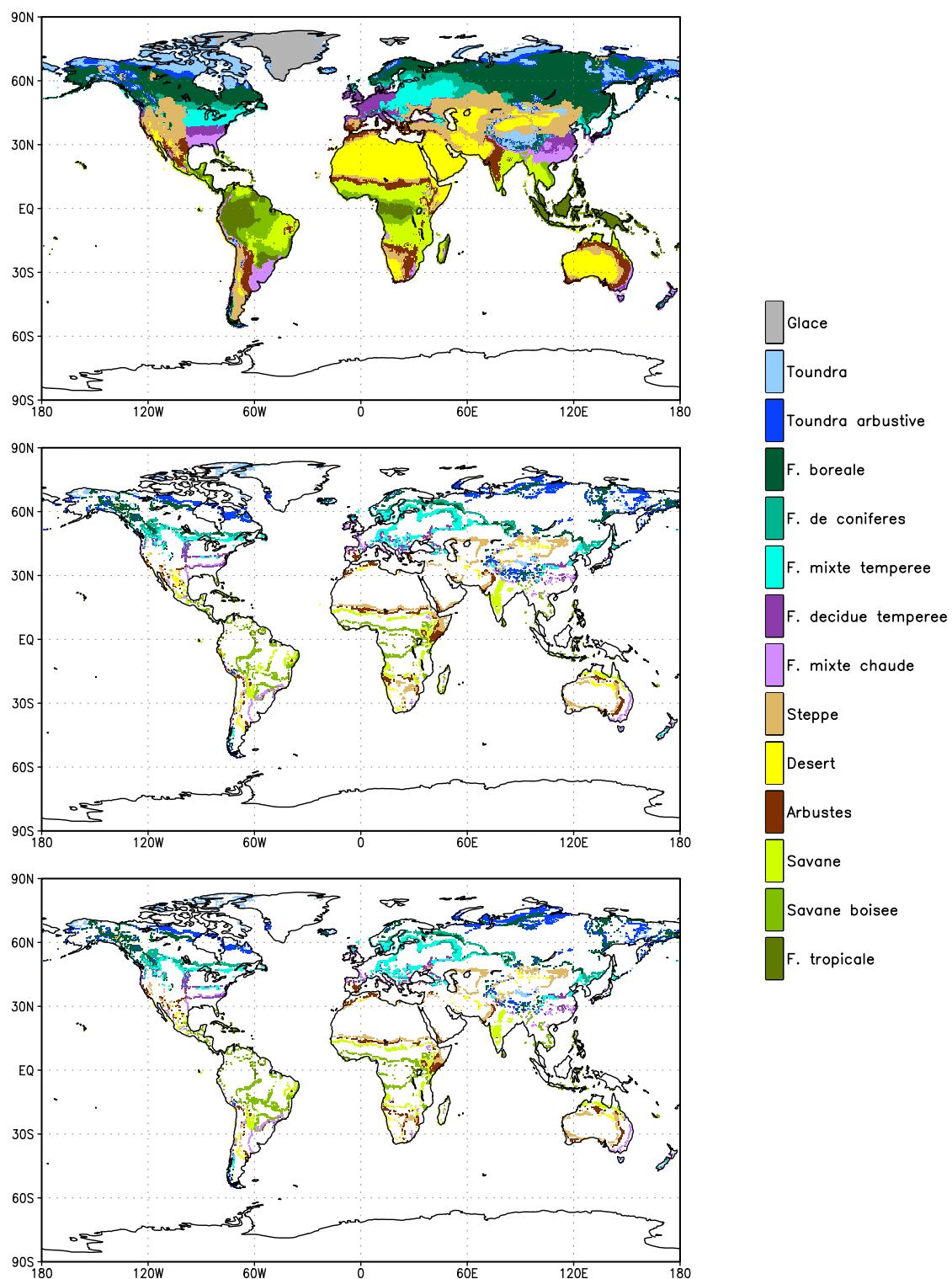


FIG. 5.10 - Carte de végétation naturelle en 1970 (en haut), en 2050 pour IMB là où elle a changé (au centre) et en 2050 pour la simulation nommée AOG (en bas) (utilisant le motif de SA2 - cf tableau 5.1-).

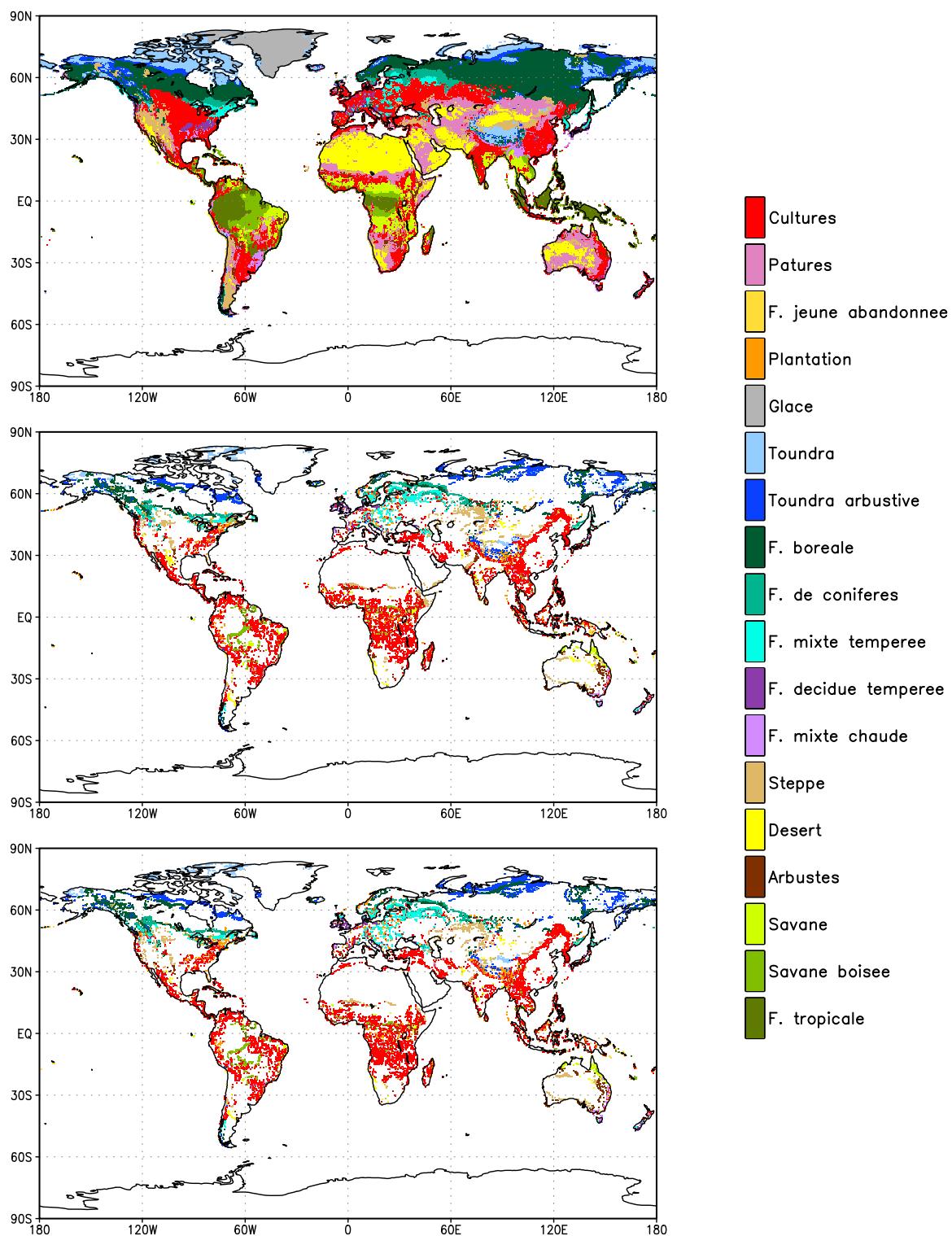


FIG. 5.11 - *Idem 5.10 pour la végétation réelle.*

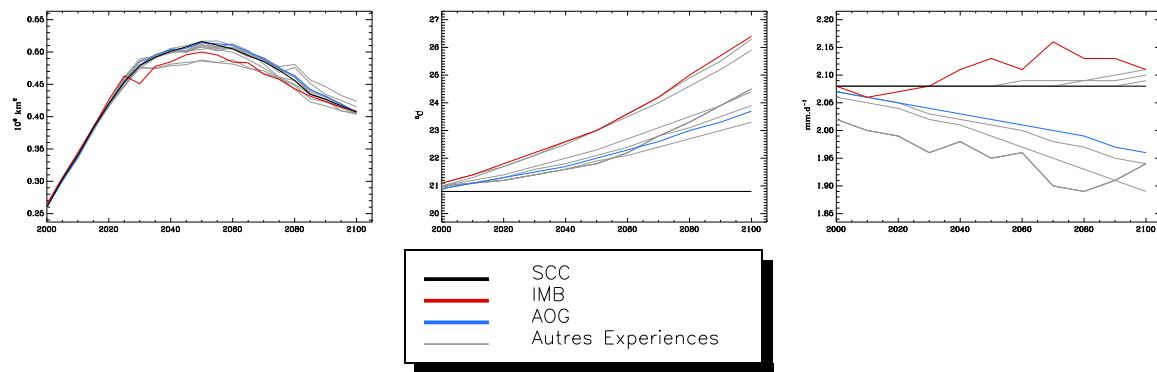


FIG. 5.12 - *Évolution de l'aire des terres cultivées (à gauche), de la température moyenne (au centre) et des précipitations moyennes (à droite) sur la région du sud de l'Afrique.*

Le système mis en place apparaît peu propice à l'apparition d'une rétroaction importante entre le climat et l'utilisation des sols.

Amérique du sud

Sur le nord de l'Amérique du sud, on a observé une tendance à la diminution des précipitations mais cela ne semble avoir aucun impact sur la végétation naturelle ou cultivée de cette région. Ces résultats sont assez différents de ceux obtenus par ? (?). Ils ont réalisé une simulation scénario avec un modèle de végétation dynamique, mais sans évolution de l'utilisation des sols. Dans leur étude, ils obtiennent un dépérissement de la forêt amazonienne suite à une réduction des précipitations sur cette région. Leur modèle simule un assèchement de cette région simplement sous l'effet de l'augmentation des GHGs sans prise en compte de la végétation dynamique. Lorsqu'ils incluent la végétation dynamique, l'assèchement provoque un stress au niveau de la végétation et une réduction de l'ouverture des stomates. Cela se traduit par une diminution progressive de la production primaire brute (quantité de carbone absorbée par la végétation). La réduction de l'ouverture des stomates entraîne aussi une réduction de l'évaporation et entretient ainsi l'assèchement sur la région. La rétroaction positive ainsi mise en place aboutit au remplacement progressif de la forêt par de la végétation basse.

Dans leur modèle, cette rétroaction est initiée par le fait que le modèle simule une réduction des précipitations sur cette région simplement due à l'augmentation de la concentration en CO₂, ce qui n'est pas le cas dans notre modèle. Dans notre simulation, l'augmentation de CO₂ favorise le développement de la forêt par fertilisation et la réduction des précipitations est trop faible pour diminuer la NPP de la végétation naturelle. En revanche, il semble probable que dans notre modèle la réduction de l'eau disponible dans

le sol, suite au remplacement partiel de la végétation naturelle par des cultures, induise une réduction de l'évaporation et des précipitations. Toutefois, cela ne concerne qu'une petite région de l'Amazonie qui est particulièrement humide. Ainsi, même après réduction, les précipitations restent à un niveau élevé (3mm.j^{-1}) qui ne suffit pas à perturber le développement de la forêt.

Fréquence et types de transitions

La figure 5.13 permet de comparer le nombre de conversions de végétation sur la grille du modèle IMAGE entre 2000 et 2100. Les simulations No CO₂ et SCC sont des simulations de référence pour lesquelles le changement de climat n'est pas pris en compte. Dans la simulation No CO₂, l'effet du CO₂ est aussi désactivé. Dans cette simulation, il n'y a pas de changement de la végétation potentielle après 2000. En revanche, cette simulation utilise le climat observé pour le XX^{ème} siècle, de sorte qu'elle simule encore des changements de végétation naturelle au XXI^{ème} siècle, résultants des transitions de végétation ayant débuté au XX^{ème} siècle.

Pour la végétation potentielle, le nombre de conversions est dépendant du changement climatique simulé. Le nombre de conversions augmente avec la sensibilité du modèle de climat à l'augmentation de la concentration en GHGs. D'autre part, les deux simulations pour lesquelles le «motif» de changement climatique évolue au cours du temps (IMB et AOG + TSM) comptabilisent le plus de conversions. L'impact du seul changement de concentration en CO₂ est assez faible, sauf pour les couverts des latitudes tropicales : désert, steppe, arbustes et savane disparaissent au profit de la savane arborée et des arbustes. Les types de végétation qui subissent le plus de conversions sont ceux des hautes latitudes (toundra, toundra arbustive et forêt boréale) car ils subissent aussi le changement de température le plus fort. Pour la végétation naturelle, on observe beaucoup moins de conversions depuis ou vers les différents types de forêt. Ceci reflète l'inertie de ces biomes qui ne se déplacent que très lentement.

Pour la végétation réelle, le nombre de conversions obtenu est beaucoup moins dépendant du changement climatique simulé. L'augmentation de la concentration en CO₂ a très peu d'effet quel que soit le type de végétation. Le changement de climat a, lui un effet notable surtout sur la végétation des hautes latitudes (toundra, toundra arbustive et forêt boréale). Les conversions se font principalement vers les cultures. On remarque que le nombre de conversions vers les cultures est limité par la prise en compte de l'augmentation de la concentration en CO₂ (tiret gris par rapport au carré noir) mais que cet effet est contrecarré par le changement climatique.

Le diagnostic du nombre de conversions ne montre pas de comportement spécifique dans la simulation IMB. Les résultats sont très similaires à ceux obtenus pour la simula-

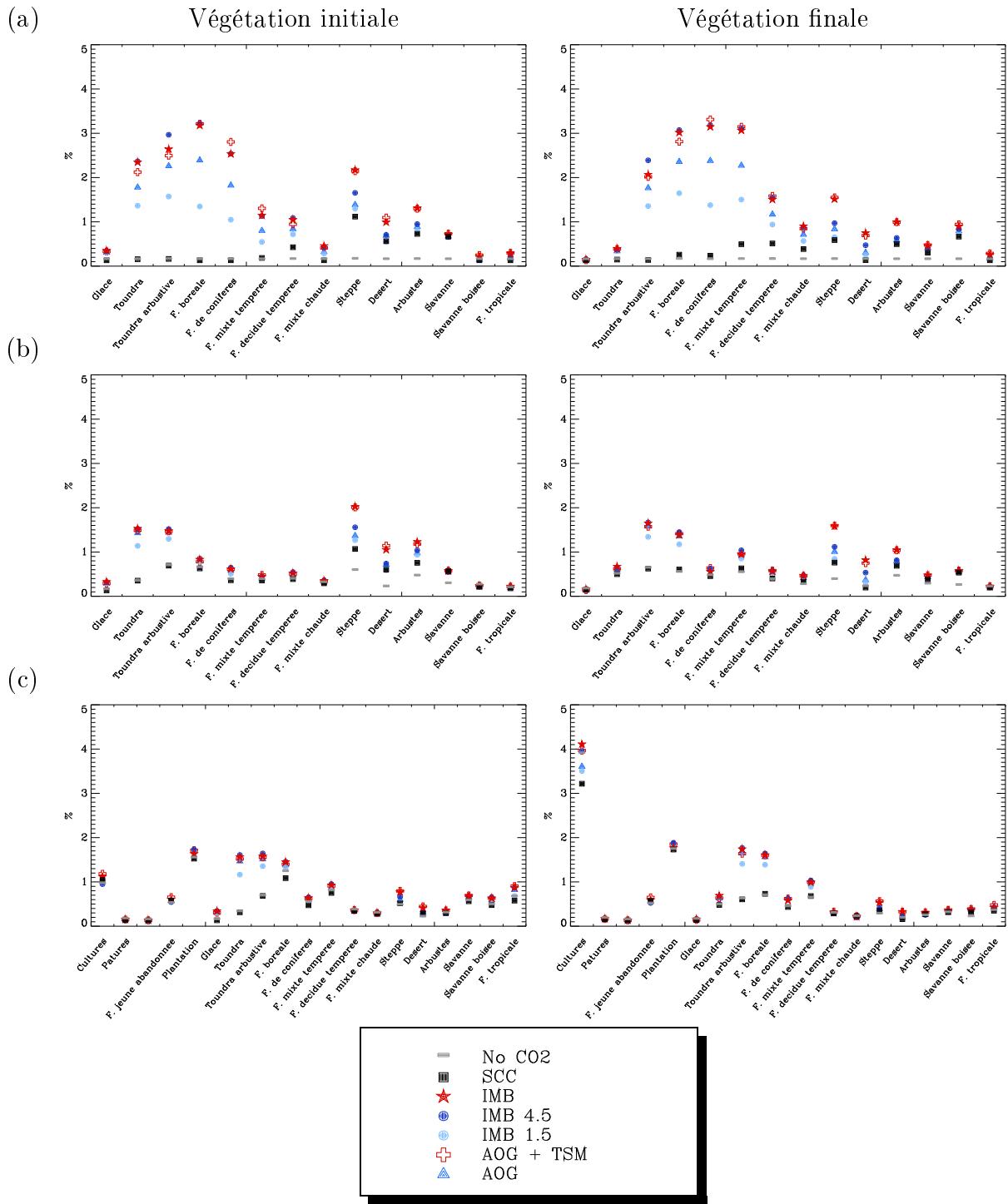


FIG. 5.13 - Pourcentage de points de grille ayant subi une conversion entre 2000 et 2100 depuis chaque type de végétation (à gauche) par rapport au nombre de point de grille couverts par ce type de végétation en 2000 et vers chaque type de végétation (à droite), pour la végétation potentielle (a), la végétation naturelle (b), et la végétation réelle (c).

tion AOG + TSM. Ceci suggère que la modélisation dans IMAGE est surtout dépendante de l'utilisation d'un motif de changement climatique évolutif, qu'il soit prescrit ou qu'il résulte d'un véritable couplage avec AOG. La similarité des résultats obtenus pour les différentes simulations IMAGE semble indiquer qu'il n'intervient pas de rétroaction climatique importante avec le système couplé AOG/IMAGE.

5.3.2 Évolution des émissions

Les émissions simulées par IMAGE dans l'expérience couplée IMB sont globalement très similaires à celles fournies par d'autres simulations IMAGE non couplées à AOG (figure 5.14). Les émissions de monoxyde de carbone et d'oxyde nitreux sont plus particulièrement dépendantes du climat simulé (comme cela a déjà été montré au chapitre 2). Pour toutes les espèces, les émissions produites par IMB sont à la limite supérieure de la gamme des scénarios obtenus.

L'augmentation des émissions se traduit par une légère augmentation de la concentration globale des différentes espèces. La simulation couplée semble amplifier légèrement l'augmentation de concentration en GHGs. Pour l'oxyde nitreux, on obtient les mêmes concentrations avec la simulation IMB 4.5. Cette simulation utilise le motif de IMB mais le module climatique d'IMAGE est activé avec le facteur de sensibilité climatique fixé à 4.5. La similarité des réponses semble indiquer que les plus fortes concentrations obtenues sont dues à l'intensité du réchauffement plutôt qu'à un effet du couplage en lui-même. Pour le monoxyde de carbone, les petites différences obtenues entre IMB et IMB 4.5 résultent d'une plus grande variabilité induite par l'évolution du motif dans IMB.

Par ailleurs, IMAGE évalue l'impact radiatif de ces concentrations sur l'atmosphère (figure 5.14). L'évolution de l'impact radiatif est peu modifiée par les différences de concentration simulées. Cela s'explique par le fait que les contributions négatives des aérosols sont elles aussi amplifiées dans la simulation IMB. Il y a ainsi globalement compensation par augmentation des contributions positives et négatives.

5.4 Conclusion

Le couplage dynamique entre AOG et IMAGE a été réalisé et une simulation de démonstration de 150 ans montre la faisabilité d'un tel couplage. Malheureusement, cette simulation test est entachée d'une rupture d'homogénéité du pas de temps qui limite la portée scientifique de la simulation. Il semble toutefois que les champs d'ARPEGE utilisés par IMAGE ne subissent pas réellement de rupture mais plutôt une dérive progressive, liée au rééquilibrage lent de l'océan. On ne remarque d'ailleurs aucune trace de la «rupture»

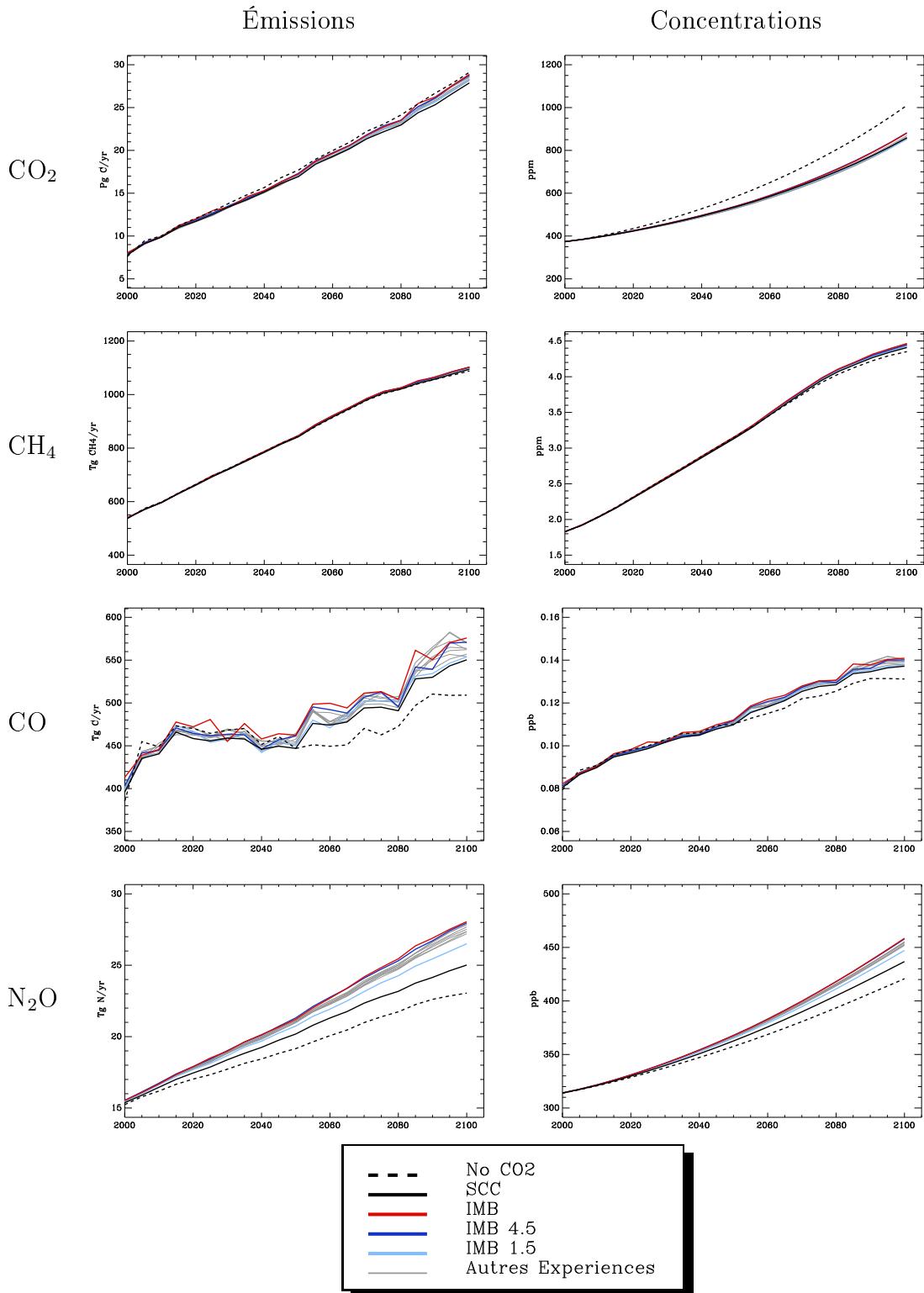


FIG. 5.14 - *Évolution des émissions et des concentrations en CO₂, CH₄, CO et N₂O au cours de simulations IMAGE.*

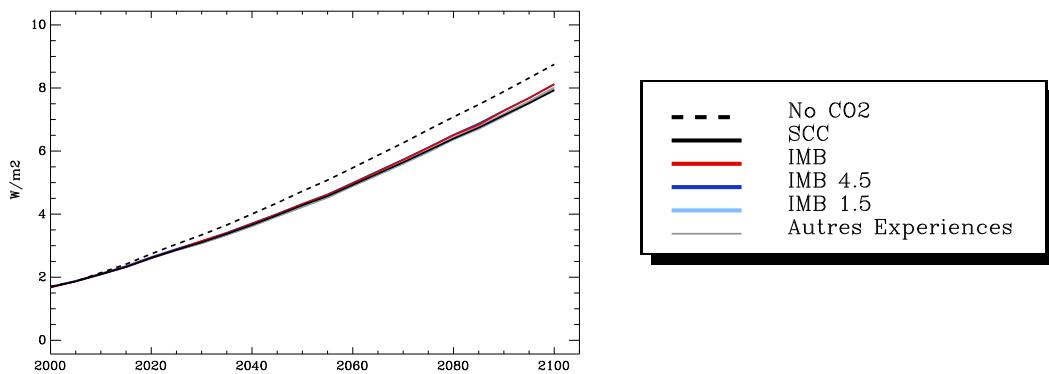


FIG. 5.15 - *Évolution du forçage radiatif atmosphérique au cours du XXI^{ème} siècle, tel que calculé par IMAGE.*

dans la simulation IMAGE. Cette simulation apporte ainsi un certain nombre d'enseignements.

D'une part, il semble que l'utilisation des sols soit dépendante de trop de facteurs autres que le climat pour qu'une rétroaction avec le climat soit vraiment significative. L'évolution de l'utilisation des sols est essentiellement due à des facteurs anthropiques (démographie, utilisation de fertilisants,...). Le cas du sud de l'Afrique montre bien que le climat est un facteur secondaire de l'évolution des surfaces cultivées. D'autre part, l'évolution de l'utilisation des sols est le phénomène prépondérant au XXI^{ème} siècle, si bien que les changements de la végétation naturelle ne sont dominants qu'aux hautes latitudes. La végétation naturelle étant plus dépendante du climat, une rétroaction pourrait avoir lieu dans ces régions. Toutefois, l'échelle de temps nécessaire à un tel phénomène serait plutôt de l'ordre de quelques siècles (le temps nécessaire pour passer de la toundra à la forêt boréale est de 60 ans dans IMAGE). ? (?) ont réalisé des simulations avec un MCG couplé à un modèle de végétation dynamique et montrent que l'on n'atteint un équilibre qu'après plusieurs siècles.

Compte tenu du faible impact des changements de végétation dans ARPEGE-Climat, mettre en évidence l'impact du changement de végétation dans une simulation climatique scénario de AOG nécessiterait de faire des ensembles de simulations avec et sans changements de végétation. Ce type d'étude serait fort coûteux et finalement peu utile à l'heure actuelle. En effet, à l'échelle d'un siècle, la simulation couplée IMAGE-AOG ne montre pas d'effet non-linéaire important. On peut donc en première approximation considérer que l'impact de la végétation se superpose linéairement à l'impact des changements de concentration en GHGs.

Conclusion

Synthèse

Jusqu'à présent, les simulations climatiques du modèle de circulation générale du CNRM, et de beaucoup d'autres centres, ne prenaient pas en compte les modifications de la végétation, causées directement (déforestation, agriculture) ou indirectement (via le changement de climat) par l'homme. Cette thèse a donc consisté à introduire un nouveau modèle dans notre système couplé océan/atmosphère/chimie/glace de mer afin de représenter les changements de distribution de la végétation. Le nouvel élément introduit, le modèle d'impact intégré IMAGE2.2, est en fait un outil plus complet qui fournit aussi des scénarios d'émissions/concentrations de GHGs et d'émissions d'aérosols sulfatés. Pour réaliser ce couplage, nous avons remplacé le module climatique simple compris dans le modèle IMAGE2.2 par notre MCG AOG. Nous avons commencé par tester la sensibilité d'IMAGE à ce changement de forçage climatique. Cette première étape s'est déroulée progressivement afin de mettre en évidence les différents aspects du changement de forçage. Il s'est ainsi avéré que le modèle IMAGE2.2 a besoin de forçages de type climatologiques ce qui impose l'utilisation de moyennes sur une trentaine d'années. Cela dénote d'emblée une des principales limites du module d'environnement d'IMAGE : il ne prend pas en compte la variabilité climatique et notamment les phénomènes extrêmes (sécheresse, vagues de froid,...) dont les conséquences pour la végétation sont probablement aussi importantes que celles liées à un changement progressif de la climatologie.

Cette première étude a par ailleurs montré que le changement climatique induit par l'augmentation de la concentration en GHGs a un impact assez fort sur la végétation naturelle des hautes latitudes, repoussant les limites de chaque type de végétation vers le nord. Au contraire, dans les régions tropicales, les changements de végétation sont essentiellement dus à l'utilisation des sols. Dans ces régions, la sensibilité au forçage climatique est plus faible, l'implantation des cultures étant dépendante de nombreux facteurs autres que le climat. Cette première étude a aussi montré que les émissions de GHGs et d'aérosols sont globalement assez peu sensibles au changement climatique utilisé.

De façon symétrique, nous avons ensuite testé la sensibilité de notre modèle climatique à des changements de végétation produits par IMAGE2.2. Nous avons ainsi montré que ces changements de végétation ont globalement un impact notablement moins important que l'augmentation des GHGs. En revanche, l'impact de l'augmentation de la concentration en GHGs sur les températures est plutôt uniforme, alors que l'impact du changement de végétation est positif ou négatif selon les régions. Localement, l'impact du changement de carte de végétation sur la température de surface peut atteindre 30% de l'amplitude de l'impact de l'augmentation de la concentration en GHGs. Il dépend aussi bien du climat initial que du type de changement de végétation opéré. Ainsi, l'extension des cultures produit un refroidissement ou un réchauffement selon que la végétation initiale était de la forêt tropicale ou de la savane. On a aussi mis en évidence que les différents aspects de la modification du couvert (albédo, longueur de rugosité,...) ont des impacts parfois antagonistes, et que l'impact des changements de végétation est alors plus difficile à expliquer. Cette étude montre aussi que les changements de végétation sont principalement des phénomènes de petite échelle. Leurs impacts sont ainsi surtout importants à l'échelle régionale et saisonnière.

Ces expériences de changements de végétation réalistes ont par ailleurs suggéré que notre modèle a une sensibilité plutôt faible. Toutefois, nous ne disposons pas de point de comparaison avec d'autres modèles pour ce type d'expérience. Des simulations plus académiques de déforestation tropicale massive ont ainsi été réalisées. Ce type d'expérience a été abondamment étudié avec de nombreux modèles et constitue ainsi un point de comparaison idéal pour situer la sensibilité de notre modèle surface/atmosphère. Ces expériences montrent que notre modèle est effectivement assez peu sensible aux changements de la végétation continentale. Toutefois, les résultats restent cohérents avec les études antérieures de déforestation tropicale. On montre l'intérêt d'analyser les impacts sur la température minimale journalière et sur la température maximale plutôt que sur la température moyenne. En effet, les deux diagnostics reflètent le comportement diurne et nocturne du bilan énergétique en surface, et permettent ainsi de mieux expliquer quels sont les mécanismes mis en oeuvre par le changement de végétation.

Ces expériences montrent également que les changements de végétation ont un impact sur la variabilité journalière et inter-annuelle des régions concernées. Ainsi, la déforestation réduit fortement la capacité du réservoir d'eau du sol et rend les régions plus sensibles à la sécheresse. Le cas du nord-est de l'Amazonie est à ce titre édifiant : sur cette région, les épisodes El Niño sont accompagnés d'une sécheresse ; une fois cette zone déforestée, ces sécheresses deviennent nettement plus intenses.

Cette étude est complétée par des simulations similaires dans le modèle couplé AOG afin de mettre en évidence le rôle de l'océan, lors de la modification des surfaces continentales. Ces expériences montrent que la température de surface de l'océan peut être

localement affectée par la déforestation tropicale, et que ces impacts peuvent s'étendre jusqu'à quelques centaines de mètres de profondeur. En revanche, en raison de leur faible amplitude, il est difficile de déterminer si ces modifications de la température en surface ont un impact en retour sur la circulation atmosphérique. Même si les expériences réalisées sont un peu courtes en rapport de la variabilité basse fréquence de l'océan, l'océan ne paraît pas jouer un rôle important lors des modifications de végétation sur les continents dans les tropiques. En revanche, les travaux de (?) suggèrent que l'impact de changements de végétation aux hautes latitudes pourrait être plus important par rétroaction avec la glace de mer.

Ces études préalables ont abouti à la réalisation d'une simulation scénario climatique du XXI^{ème} siècle avec le nouveau système couplé IMAGE/AOG. La simulation présentée ici est une sorte de «coup d'essai». Elle montre la faisabilité du couplage : les résultats des deux modèles ne sont pas profondément modifiés par le couplage, mais les impacts des activités humaines sur le forçage radiatif et l'utilisation des sols sont pris en compte de manière cohérente, et la rétroaction de la végétation naturelle est également introduite. En revanche, cette simulation comporte encore deux défauts qui en limitent la portée scientifique : une rupture d'origine numérique en milieu de XXI^{ème} siècle ainsi qu'une erreur dans la prescription du forçage en aérosols sulfatés dans ARPEGE-Climat. Les résultats produits par IMAGE sont cependant très proches de ceux fournis par des simulations non couplées avec ARPEGE. Ceci semble indiquer que le couplage a peu d'impact sur la modélisation IMAGE, et par la même occasion que les problèmes rencontrés dans la simulation ARPEGE n'ont pas vraiment d'impact sur la simulation couplée. Il serait néanmoins souhaitable de refaire une telle simulation pour confirmer ces premiers résultats. Une seule simulation est cependant peu utile pour analyser l'impact des changements de végétation dans ARPEGE. Comme cela a été montré dans les études précédentes, les changements de végétation produits par IMAGE ont un faible impact sur le climat ; celui-ci peut difficilement être mis en évidence dans de telles simulations couplées transitoires. Pour discriminer l'impact des changements de végétation, il faudrait procéder à des ensembles de simulations du XXI^{ème} siècle avec et sans changement de végétation. Une telle étude serait coûteuse et aurait finalement une portée scientifique limitée, au vu des nombreuses autres sources d'incertitudes qui affectent les scénarios climatiques.

Le fait que la simulation couplée ne modifie pas les résultats produits par IMAGE montre qu'aucune rétroaction positive ou négative majeure ne se met en place entre le changement de climat et le changement de végétation dans la simulation réalisée. Il est peu probable que les défauts de la simulation puissent avoir empêché l'apparition de telles rétroactions : les erreurs interviennent sur le climat global et ne modifient pas le lien local entre les changements de végétation et le climat. D'autre part, les études de sensibilité réalisées au préalable montrent que la végétation dans IMAGE est finalement assez peu

sensible au changement de climat appliquée. Deux explications sont données à cela :

- Dans les tropiques, les changements de végétation, dans les scénarios démographiques et économiques retenus par IMAGE, sont essentiellement dominés par les modifications de l'utilisation des sols. Ces changements sont pilotés par de nombreux facteurs, dont la démographie, la proximité d'autres exploitations et les améliorations des pratiques agricoles, le climat n'étant qu'un facteur parmi d'autres. Il est ainsi difficile de voir s'établir une rétroaction entre le changement de climat et les cultures.
- Les changements de végétation naturelle sont plus lents ; les durées de transition vers les forêts étant de plusieurs décennies, des simulations à l'horizon d'un siècle ne peuvent voir se mettre en place des changements de végétation suffisamment importants pour donner lieu à une forte rétroaction climatique. Les rétroactions entre la végétation naturelle et le climat pourraient être particulièrement importantes aux hautes latitudes, comme cela a été montré par ? (?), mais il faut plusieurs siècles pour que les changements de végétation affectent notablement le climat. A cette échéance d'autres rétroactions encore mal maîtrisées dans les modèles de climat (circulation thermohaline, calottes polaires, pergélisol...) pourraient jouer un rôle beaucoup plus important que la biosphère continentale.

Perspectives

Les résultats obtenus sont naturellement liés à la sensibilité des modèles utilisés. Nous avons déterminé que AOG avait une sensibilité plutôt faible aux changements de végétation par rapport à d'autres modèles de circulation générale. De même, dans IMAGE, la gestion des cultures a une faible sensibilité au climat. Avec des modèles plus sensibles, le couplage aurait pu avoir un impact plus important. Un projet d'intercomparaison de la sensibilité des modèles de climat à des changements d'utilisation des sols est en cours de préparation. Cette étude permettra de situer la sensibilité de notre modèle dans le cadre de changements de végétation plus réalistes que pour les déforestations tropicales. Par ailleurs, le projet PRISM, en créant des interfaces communes à tous les modèles, devrait permettre de coupler différents modèles de surface avec un même modèle atmosphérique et inversement. Cela donnera la possibilité de mieux analyser l'origine des différences de sensibilité. Toutefois, il est difficile de valider ces sensibilités, nous ne disposons pas de cas d'étude documentés à l'échelle globale pour espérer les évaluer. Ainsi, on ne peut actuellement déterminer si la sensibilité de notre modèle est plus ou moins réaliste qu'une autre.

Nous pouvons suggérer une amélioration du modèle IMAGE qui pourrait moduler les conclusions de cette étude. IMAGE ne considère que les changements moyens du climat et non les changements de variabilité. Or, le changement de climat associé à l'augmentation

de la concentration en GHGs semble accompagné d'une modification de la variabilité haute fréquence. ? (?) ont ainsi montré que dans des simulations climatiques du XXI^{ème} siècle de MCG, les températures extrêmes sont modifiées ainsi que la durée des épisodes de sécheresse. De même, ? (?) ont montré que la fréquence des jours de gel était réduite et que la saison de croissance était allongée. Ces modifications des extrêmes pourraient avoir un effet plus important sur les écosystèmes que les changements de température moyens (?). Par exemple, ? (?) ont montré que l'augmentation de la variabilité climatique favorisait la végétation basse aux dépens des forêts. Il est ainsi possible que la prise en compte de la variabilité climatique accélère les changements de végétation. Pour cela, on pourrait par exemple introduire des indices liés à la fréquence des événements extrêmes qui permettraient d'accélérer ou non les transitions entre types de végétation. Par ailleurs, un tel développement pourrait être accompagné d'une modification de la méthode de forçage climatique par ARPEGE. Il a été montré qu'IMAGE recalculait un bilan hydrique à partir des données mensuelles de précipitations et de température. Ce module pourrait être supprimé et les diagnostics d'évaporation potentielle, réelle et de disponibilité en eau dans le sol calculés par ARPEGE directement fournis au module de végétation d'IMAGE.

Les modèles de végétation dynamique (TRIFFID ? (?), IBIS ? (?), ORCHIDEE ? (?)) qui commencent actuellement à être couplés à des MCGs sont eux plus adéquats pour bien prendre en compte la variabilité climatique à toutes échelles temporelles. Ils offrent aussi l'avantage de modéliser de manière plus physique le cycle du carbone. En revanche, ces modèles ne prennent pas encore en compte l'utilisation des terres. Les travaux présentés ici indiquent que les changements naturels et anthropiques ont des impacts différents sur le climat. L'inclusion de la végétation dynamique dans des simulations du XXI^{ème} siècle ne semble alors apporter aucune amélioration au réalisme des projections si elle n'est pas accompagnée de l'évolution de l'utilisation des terres. Notre étude permet de proposer une méthode pour inclure ces changements d'utilisation des sols. Si la faible sensibilité de l'utilisation des terres au climat est confirmée, il serait possible de proposer un scénario d'évolution de l'utilisation des terres, comme on utilise actuellement des scénarios d'émission des GHGs et des aérosols. Ce scénario indiquerait les régions où il faudrait «installer» des cultures au cours du temps. Pour les zones où l'on n'impose pas de changement de végétation anthropique, la végétation continuerait à être modélisée par le module de végétation naturelle et à évoluer selon le climat. Cette méthode a le double avantage d'être assez facile à mettre en oeuvre et de modéliser la couverture végétale de façon réaliste.

Les travaux présentés semblent indiquer que la végétation est un élément relativement secondaire dans la modélisation climatique globale. Lors de cette thèse, nous avons modifié tous les forçages appliqués à notre MCG et il s'avère que la représentation de l'effet des aérosols est encore très incertaine et nécessite une étude plus approfondie. L'impact des

aérosols semble bien plus conséquent que celui de la végétation, mais il est encore mal quantifié. Avant de représenter les effets de la végétation, l'urgence semble donc être de mieux paramétriser l'impact des aérosols sulfatés puis carbonés.

Par ailleurs, les changements de végétation ont essentiellement un impact régional et saisonnier. Ces constatations suggèrent que l'analyse des interactions entre la végétation et le climat est probablement plus profitable si elle est réalisée à plus petite échelle que dans un modèle global de circulation générale. Il semble ainsi que l'étude à posteriori des impacts des changements de végétation dans un modèle régional forcé par la circulation de grande échelle produite par un modèle de circulation générale pourrait donner des résultats plus fructueux du point de vue de l'évolution des écosystèmes. Les résultats ainsi trouvés pourraient permettre d'affiner ensuite les scénarios d'évolution de l'utilisation des terres.

Même s'il est difficile de détecter l'impact du couplage sur la modélisation climatique, l'utilisation de forçages cohérents (concentrations en GHGs, charge en aérosols et carte de végétation) pour la réalisation de simulations climatiques est particulièrement importante pour les études de détection et d'attribution du changement climatique. L'inclusion des changements de végétation est d'autant plus importante pour de telles études à l'échelle régionale.

Un autre axe de développement intéressant est la prise en compte de la dégradation des sols, en particulier après la déforestation. Ainsi, lorsque les sols n'ont plus de couverture végétale, l'érosion s'amplifie, limitant la possibilité de réimplantation de la végétation. Par ailleurs, les propriétés locales de surface sont tout aussi modifiées que lors d'un changement de végétation : la capacité du réservoir d'eau du sol diminue, augmentant ainsi le ruissellement et pouvant être à l'origine d'une intensification des inondations. Dans le système actuel, la diminution de la profondeur racinaire est instantanée, et ISBA sous-estime les écoulements de surface qui produisent ces inondations. L'agrégation des paramètres de surface à l'échelle d'une maille d'ARPEGE ne permet pas de représenter correctement la variabilité sous maille des processus hydrologiques. Une meilleure modélisation de l'hydrologie apparaît ainsi comme une des priorités dans le développement des modèles de surface.

Au terme de cette thèse, un élément important mérite d'être rappelé : dans la simulation couplée AOG/IMAGE réalisée, le modèle IMAGE utilise les anomalies du changement climatique et non directement le climat simulé par notre modèle. Il en est ainsi car le climat simulé par AOG n'est pas encore suffisamment réaliste pour pouvoir directement être utilisé par un module d'environnement. Cette constatation n'est pas spécifique à notre MCG et souligne que les modèles de circulation générale ont encore besoin d'être améliorés, et que le couplage abrupt avec des modèles de végétation dynamique et/ou du cycle

du carbone n'est pas nécessairement l'option la plus fiable, tant que ces problèmes de biais systématiques ne sont pas réglés.

Liste des tableaux

1.1	Modèles d'impact intégrés documentés. Les noms des modèles utilisés pour calculer les scénario d'émission SRES sont suivis d'une astérisque.	15
1.2	Types d'émissions naturelles et dues à l'utilisation des sols prises en compte dans IMAGE. L'échelle correspond au niveau de précision spatiale auquel est déterminé chaque type d'émission : G=Global, R=Régional, L=Local par point de grille.	23
2.1	Tableau récapitulatif des simulations IMAGE réalisées	37
3.1	Table de correspondance possible entre les classes IMAGE et les classes IGBP	73
3.2	Moyenne spatiale du rapport de l'équation 3.18 pour les moyennes saisonnières et les moyennes anuelles de température de l'air en surface.	82
3.3	Types de transitions principales rencontrées dans les régions étudiées. TOT indique le nombre total de points de grille compris dans la région à la résolution de 0.5° , STAB indique le pourcentage de points n'ayant pas changé de type de végétation et CHGE indique le pourcentage de points concernés par chaque type de transition.	85
5.1	Tableau récapitulatif des simulations IMAGE utilisées dans ce chapitre. . .	121
D.1	Valeurs des paramètres du modèle de surface ISBA pour chacun des types de la classification IMAGE. L'émissivité de la végétation est prise égale à 0.97, et le coefficient thermique vaut $2.10^{-5} \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$ pour la végétation basse (B) et $10^{-5} \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{J}^{-1}$ pour la végétation haute (H).	166

Liste des figures

1.1	Représentation schématique des composantes d'un modèle d'impacts intégré appliqué au changement climatique	13
1.2	Les grandes familles de scénarios proposées par le GIEC.	19
1.3	Schéma de fonctionnement du modèle intégré IMAGE2.2	20
2.1	(a) Exemple de motif de température de surface obtenu pour le modèle AOG à partir d'une simulation scénario, en calculant l'anomalie des moyennes sur les périodes 2070-2099 et 1970-1999. (b) Anomalie obtenue à partir de la même simulation mais pour la période 2050-2079 par rapport à 1970-1999. (c) Anomalie obtenue en appliquant le motif présenté en (a) à l'anomalie de 2.2°C.	31
2.2	Idem figure 2.1 pour les précipitations, en utilisant les rapports de températures moyennes globales comme facteur de proportionnalité pour obtenir la figure (c) à partir de la figure (a).	33
2.3	Moyennes zonales du nombre de jours de la saison chaude (en rouge), de la saison humide (en bleu), et de la saison de croissance résultante (en noir) pour les années 1970 (en trait fin) et 2100 (en trait gras).	34
2.4	Schéma des expériences de sensibilité réalisées avec IMAGE.	36
2.5	Moyenne zonale des anomalies de température en moyenne annuelle entre 2100 et 1990 sur les continents (la moyenne globale de chaque expérience est identique dans les trois cas).	38
2.6	Anomalies de température à 2 mètres en janvier et juillet en 2100 par rapport à 2000, pour les motifs de AOG, du HadCM2, et du GFDL.	39
2.7	Idem figure 2.6 pour les précipitations.	40
2.8	Évolution de la surface occupée par la toundra, la toundra arbustive et la glace.	41

2.9 Productivité des terres cultivées (a) sur l'Inde et (b) en moyenne globale en différents types de céréales en 2100, pour une simulation de référence où l'on ne change pas le climat (SCC) et pour trois motifs de changement climatique : celui de AOG, celui du GFDL et celui de HadCM2. Les changement de durée de la saison de croissance ΔL et de la température moyenne durant cette saison ΔT sont indiqués pour chaque simulation.	42
2.10 Productivité potentielle des cultures pour (a) l'ensemble des régions, (b) le Canada (c) l'Afrique du Sud en 2100, pour tous les points de la région (colonne de gauche), et pour les points qui ont été effectivement cultivés (colonne de droite). Pour chaque région, seules les cultures cultivées sur plus de 5% de la surface totale cultivée de la région ont été prises en compte.	44
2.11 Taux d'évolution de la température moyenû sur les continents.	47
2.12 Évolution de la productivité (a) des céréales tempérées en moyenne globale, et (b) sur l'Europe de l'Est.	47
2.13 Évolution de la surface couverte par les forêts de conifères (en haut), par des arbustes (au milieu) et par les forêts tropicales (en bas) pour les cartes de végétation potentielle (colonne de gauche), naturelle (au centre) et réelle (à droite).	48
2.14 (a) Anomalies de température moyenne globale de l'océan et (b) flux de carbone de l'océan vers l'atmosphère.	50
2.15 Moyenne zonale des anomalies de nébulosité, évaporation potentielle et évaporation réelle en 2100 entre la simulation introduisant les changements de nébulosité et la simulation de référence.	51
2.16 Évolution de l'évaporation réelle en moyenne globale sur les continents calculée par IMAGE au cours des simulations AOG + TSM et AOG + Neb. .	52
2.17 Carte de végétation potentielle en 1970 (en haut), en 2100 pour la simulation SCC (seuls les points pour lesquels la végétation a changé par rapport à 1970 sont indiqués) et en 2100 pour la simulation AOG + TSM.	54
2.18 Idem 2.17 pour la végétation naturelle.	55
2.19 Idem 2.17 pour la végétation réelle.	56
2.20 Évolution de la proportion (a) des terres cultivées ou exploitées pour le bois qui correspond à la proportion des terres utilisées par l'homme et (b) de la végétation naturelle non en équilibre avec le climat (i.e. végétation naturelle différente de la végétation potentielle).	57

2.21	Émissions dues à l'utilisation des sols.	58
2.22	Émissions naturelles de N ₂ O.	59
2.23	Émissions totales	59
3.1	Schéma du type de modèle de surface «Bucket» à gauche et «Big-Leaf» à droite.	66
3.2	Carte de végétation de 1980 (en haut) et de 2050 (seuls les points pour lesquels la végétation a changé par rapport à 1980 sont indiqués)	76
3.3	Carte de la proportion de végétation (à gauche) et de profondeur de sol en mètres (à droite) pour 1980 et 2050 ainsi que les différences entre les deux cartes.	78
3.4	Anomalies zonales des propriétés de surface pour l'albédo, la résistance stomatique à l'échelle du couvert, l'indice foliaire et la longueur de rugosité entre la carte de 2050 et la carte de 1980.	79
3.5	Changement de température de l'air en surface en moyenne annuelle pour le changement de végétation sous le climat actuel (a), et sous le climat futur (c), pour le changement de concentration en GHGs avec la carte de végétation de 1980 (b). Les isolignes délimitent les régions d'impact statistiquement significatifs au niveau de confiance 90%, 95% et 99%. La carte (d) représente le rapport $\frac{ \Delta T_{veg} _{GHG1980} + \Delta T_{veg} _{GHG2050}}{ \Delta T_{GHG} _{veg1980} + \Delta T_{GHG} _{veg2050}}$ (voir dans le texte).	81
3.6	Idem figure 3.5 pour les précipitations.	83
3.7	Domaines utilisés dans ce chapitre.	84
3.8	Cycle annuel moyen des anomalies de température moyenne, minimale et maximale pour les 4 régions tropicales étudiées (cf carte 3.7), entre les expériences CL1 et FL1 à gauche et entre CL2 et FL2 à droite. Ces anomalies représentent les changements dus au changement de carte de végétation.	87
3.9	Idem figure 3.8 mais pour l'évaporation totale, l'évapotranspiration et l'évaporation du sol nu.	89
3.10	Anomalies de température minimale en moyenne annuelle auxquelles on a superposé le changement du coefficient thermique de la végétation C_v (en haut) et le changement d'émissivité (en bas) pour les deux expériences de changement de végétation sous climat de 1980 (à gauche) et de 2050 (à droite). Pour le coefficient thermique, les isolignes sont espacées de $10^{-6} K.m^2.J^{-1}$, pour l'émissivité, elles ont espacées de 0.1%.	91

3.11 Anomalies moyennes de température maximale en JAS auxquelles on a superposé l'anomalie moyenne d'évaporation sur la même période pour les deux expériences de changement de végétation (les isolignes sont espacées de $0.1mm.j^{-1}$).	92
3.12 Anomalies de température moyenne en DJF auxquelles on a superposé l'anomalie d'albédo pour les deux expériences de changement de végétation (les isolignes sont espacées de 0.01).	93
3.13 Idem figure 3.12 pour JJA avec les isolignes espacées de 0.005.	93
3.14 Anomalies de la pression au niveau de la mer en hPa pour les deux expériences de changement de végétation. Les isolignes indiquent les anomalies significatives selon un test de Student à 90%, 95% et 99%.	94
3.15 Anomalies de la norme du vent à 300hPa pour les deux expériences de changement de végétation. Les isolignes indiquent les anomalies significatives selon un test de Student à 90%, 95% et 99%. Les vecteurs indiquent le vent de l'expérience de contrôle (respectivement CL1 et CL2) dans chaque cas.	95
 5.1 Schéma de fonctionnement du couplage entre AOG et IMAGE2.2	107
5.2 Concentrations en gaz à effet de serre pour les simulations SA2, et IMB (de type A2) et la simulation SB2 (de type B2)	110
5.3 Charge globale moyenne en aérosols sulfatés en $mg\text{ de S.m}^{-2}$ pour les simulations IMB, SA2 et SB2.	111
5.4 Logarithme de la répartition de la charge en aérosols sulfatés en 2050, dans la simulation IMB, telle qu'elle aurait dû être dans IMB sans bug, et d'après les projections de Boucher préparées pour le 4 ^{me} rapport du GIEC (voir http://www-loa.univ-lille1.fr/~boucher/sres/). La 4 ^{ème} carte montre la différence des logarithmes de la charge avec et sans le bug.	112
5.5 Anomalies zonales des propriétés de surface pour la période 2090-2099 par rapport à la période 1970-1979 pour la simulation IMB.	114
5.6 Évolution de la moyenne globale annuelle du bilan radiatif net en surface, de la température à 2 mètres et des précipitations.	115
5.7 Évolution de la température moyenne à 2 mètres sur les continents pour différents domaines (moyennes glissantes sur 30 ans) ainsi qu'en global sur les océans.	117
5.8 idem 5.7 pour les précipitations.	118

5.9	Anomalies annuelles de température à 2m (en haut) et de précipitations (en bas) pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1970-1999.	120
5.10	Carte de végétation naturelle en 1970 (en haut), en 2050 pour IMB là où elle a changé (au centre) et en 2050 pour la simulation nommée AOG (en bas) (utilisant le motif de SA2 -cf tableau 5.1-).	123
5.11	Idem 5.10 pour la végétation réelle.	124
5.12	Évolution de l'aire des terres cultivées(à gauche), de la température moyenne (au centre) et des précipitations moyennes (à droite) sur la région du sud de l'Afrique.	125
5.13	Pourcentage de points de grille ayant subi une conversion entre 2000 et 2100 depuis chaque type de végétation (à gauche) par rapport au nombre de point de grille couverts par ce type de végétation en 2000 et vers chaque type de végétation (à droite), pour la végétation potentielle (a), la végétation naturelle (b), et la végétation réelle (c).	127
5.14	Évolution des émissions et des concentrations en CO ₂ , CH ₄ , CO et N ₂ O au cours de simulations IMAGE.	129
5.15	Évolution du forçage radiatif atmosphérique au cours du XXI ^{ème} siècle, tel que calculé par IMAGE.	130

Bibliographie

- Alcamo, J., R. Leemans and E. Kreileman (1998). Global modelling of environmental change : an overview of IMAGE 2.1. *Global change scenarios of the 21st century*. Elsevier Science. 3–96.
- Darwin, R. (1998). *FARM : a global framework for integrated land use/cover modeling*. Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, Canberra, Australia(Available online <http://eprints.anu.edu.au/archive/00000766/00/eep9802.pdf>). *Tech. Rep. n° 9802*.
- de Vries, B., J. Bollen, L. Bouwman, M. den Elzen, M. Janssen and E. Kreileman (2000). Greenhouse gas emissions in an equity-, environment- and service-oriented world : an IMAGE-based scenario for the 21st century. *Tech. Forecasting and Social Change*, 63, 137–174.
- Edmonds, J., M. Wise, H. Pitcher, R. Richels, T. Wigley and C. MacCracken (1996a). An integrated assessment of climate change and the accelerated introduction of advanced energy technologies : an application of MiniCAM1.0. *Mitigation and Adaptation strategies for global change*, 1, 311–339.
- Edmonds, J., M. Wise, R. Sands, R. Brown and H. Kheshgi (1996b). *Agriculture, land-use and commercial biomass energy. A preliminary integrated analysis of the potential role of biomass energy for reducing future greenhouse related emissions*. Pacific Northwest National Laboratories, Washington DC. *Tech. Rep. n° PNNL-11155*.
- Eickhout, B., M. den Elzen and E. Kreileman (2001). *The atmospheric ocean system in IMAGE 2.2*. National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands. *Tech. Rep. n° 481508017*.
- Fisher, G., H. van Velthuizen, F. Nechtergael and S. Medow (2000). *CD-ROM : Global Agro-Ecological Zones*. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, Italy ; and International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Fujii, Y., K. Yamaji and T. Kawabe (1998). Simulation of CO₂ Emission in Japan, China and North America with DNE21 Model. *Energy and Resources*, 19, 371–377.

- Hulme, M., T. Wigley, E. Barrow, S. Raper, A. Centella, S. Smith and A. Chipanski (2000). *Using a climate scenario generator for vulnerability and adaptation assessments : MAGICC and SCENGEN version 2.4 workbook*. Climate Research Unit, Norwich, UK.
- IMAGE-team (2001a). *The IMAGE2.2 implementation of the SRES scenarios. A comprehensive analysis of emissions, climate change and impacts in the 21st century. Main disc*. National Institutue for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, the Netherlands.
- IMAGE-team (2001b). *The IMAGE2.2 implementation of the SRES scenarios. Climate change scenarios resulting from runs with several GCMs. Supplementary disc*. National Institutue for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, the Netherlands.
- Jiang, K., M. Toshihiko, T. Morita and Y. Matsuoka (2000). Long-term GHG emission scenarios for Asia-Pacific and the world. *Tech. Forecasting and Social Change*, 63, 207–229.
- Kamenkovich, I., A. Sokolov and P. Stone (2002). An efficient climate model with a 3D ocean and statistical-dynamical atmosphere. *Climate Dyn.*, 19, 585–598.
- Kemfert, C. (2002). An Integrated Assessment Model of Economy-Energy-Climate - The model WIAGEM-. *Integrated Assessment, an International Journal*, 3.
- Leemans, R. and A. Solomon (1993). Modeling the potential change in yield and distribution of the earth's crops under a warmed climate. *Clim. Res.*, 3, 79–96.
- Manne, A. and R. Richels (1995). The Greenhouse Debate : Economic Efficiency, Burden Sharing and Hedging Strategies. *Energy J.*, 16, 1–37.
- Manne, A. and R. Richels (2004). *MERGE : An integrated assessment model for global climate change*. Standford University (Available online <http://www.stanford.edu/group/MERGE/GERAD1.pdf>).
- Matsuoka, Y., T. Morita and M. Kainuma (2001). Integrated assessment model of climate change : the AIM approach. *Present and future of modeling global environmental change : Toward integrated modeling*. T. Matsuno and H. Kida, TERRAPUB Eds. 339–361.
- Mori, S. (2000). The development of greenhouse gas emissions scenarios using an extension of the MARIA model for the assessment of resource and energy technologies. *Tech. Forecasting and Social Change*, 63, 289–311.
- Nakicenovic, N. (2000). Global greenhouse gas emissions scenarios : integrated modeling approaches. *Tech. Forecasting and Social Change*, 63, 105–109.
- Nordhaus, W. and J. Boyer (2000). *Warming the World : Economics Models of Global Warming*. MIT Press, Cambridge.
- Prentice, I., M. Sykes and W. Cramer (1993). A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscape. *Ecological Mod.*, 65, 51–70.

- Prinn, R., H. Jacoby, A. Sokolov, C. Wang, X. Xiao, Z. Yang, R. Eckaus, P. Stone, D. Ellerman, J. Melillo, J. Fitzmaurice, D. Kicklighter, G. Holian and Y. Liu (1999). Integrated Global System Model for climate policy assessment : feedbacks and sensitivity studies. *Clim. Change*, 41, 469–546.
- Riahi, K. and A. Roehrl (2000). Greenhouse gas emissions in a dynamics-as-usual scenario of economic and energy development. *Tech. Forecasting and Social Change*, 63, 175–205.
- Sankovski, A., W. Barbour and W. Pepper (2000). Quantification of the IS99 emission scenario storylines using the Atmospheric Stabilization Framework. *Tech. Forecasting and Social Change*, 63, 263–287.
- Schlesinger, M., S. Malyshev, E. Rozanov, F. Yang, N. Andronova, B. de Vries, A. Grubler, K. Jiang, T. Masui, T. Morita, J. Penner, W. Pepper, A. Sankovski and Y. Zhang (2000). Geographical distributions of temperature change for scenarios of greenhouse gas and sulfur dioxide emissions. *Tech. Forecasting and Soc. Change*, 65, 167–193.
- Tol, R. (2002a). New Estimates of the Damage Costs of Climate Change. *Environmental and Resource Economics*, 21, 135–160.
- Tol, R. (2002b). New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part I : Benchmark Estimates. *Environmental and Resource Economics*, 21, 47–73.
- Toth, F., T. Bruckner, H. Fussel, M. Leimbach and G. Petschel-Held (2003). Integrated assessment of long-term climate policies : Part 1 - Model Presentation. *Clim. Change*, 56, 37–56.
- Van Minnen, J., R. Leemans and F. Ihle (2000). Defining the importance of including transient ecosystem responses to simulate C-cycle dynamics in a global change model. *Global Change Biology*, 6, 595–611.
- Weyant, J., O. Davidson, H. Dowlatabadi, J. Edmonds, M. Grubb, E. Parson, R. Richels, J. Rotmans, P. Shukla, R. Tol, W. Cline and S. Fankhauser (1996). Integrated assessment of climate change : an overview of approaches and results. In *Climate change 1995 : economic and social dimensions - Contribution of working group III to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 374–396. J.P. Bruce, H. Lee and E.F. Haites. Cambridge University Press, Cambridge.

Annexes

Annexe A

Bilan hydrique et calcul des indices climatiques

Ce module du modèle d’impacts intégré IMAGE2.2 calcule les indices climatiques nécessaires aux modules de calcul de la végétation potentielle et de calcul de la productivité potentielle des cultures. Il utilise uniquement les données suivantes :

- ▶ la température moyenne mensuelle
- ▶ le cumul de précipitations mensuel
- ▶ la nébulosité moyenne mensuelle
- ▶ la moyenne de température diurne mensuelle

Les anomalies de température moyenne mensuelle et de précipitations sont celles imposées par le module de climat. Il est considéré que l’anomalie de température diurne moyenne est égale à celle de la température moyenne. Ceci n’est pas forcément vérifié en régions tropicales comme cela est montré au chapitre 3. La nébulosité est gardée constante tout au long d’un scénario. Cette autre hypothèse ne semble pas vraiment vérifiée par les simulations climatiques réalisées par les MCGs mais ce paramètre n’est pas modélisé par le module climatique d’IMAGE.

A.1 Bilan hydrique

Ce module calcule une évapotranspiration potentielle (ETP), qui est uniquement fonction de la température et de l’ensoleillement. Ensuite, l’évaporation réelle (ETR) est calculée comme celle permettant d’obtenir des réservoirs d’eau dans le sol à l’équilibre sur un cycle annuel. Ces deux étapes sont réalisées en faisant des bilans journaliers. Pour cela, les données mensuelles sont interpolées au pas de temps journalier. Pour les précipitations, on considère que la moyenne mensuelle est atteinte au milieu du mois et la précipitation

journalière est linéairement interpolée entre chaque milieu de mois. Pour les températures et la couverture nuageuse, l'interpolation est de type cubique.

A.1.1 Calcul de l'évaporation potentielle

Le calcul de l'évaporation potentielle est réalisé conformément au modèle décrit par Prentice *et al.* (1993). L'évaporation potentielle (ETP) est l'évaporation qui aurait lieu à la surface s'il n'y avait pas de limitation par la quantité d'eau dans le sol. L'ETP est fonction de l'énergie disponible pour évaporer :

$$ETP = 3600\{s(T)/(s(T) + \gamma)\}R_n/L \quad (\text{A.1})$$

où s est le taux d'augmentation de la pression de vapeur saturante en fonction de la température, γ est la constante psychrométrique, L la chaleur latente de vaporisation et R_n est le rayonnement net à la surface. s suit la loi suivante :

$$s(T) = 2.503 \times 10^6 \frac{\exp\{17.269T/(237.3 + T)\}}{(237.3 + T)^2} \quad (\text{A.2})$$

où T est exprimée en °C.

Pour évaluer l'ETP, il faut donc connaître le rayonnement net à la surface. Pour cela il faut évaluer le rayonnement solaire net R_s descendant et le rayonnement thermique net R_l montant.

$$R_l = (b + (1 - b)n)(A - T) \quad (\text{A.3})$$

où A et b sont des constantes empiriques, et n est la nébulosité moyenne.

$$R_s = (c + dn)(1 - \alpha)Q_o \cos(z) \quad (\text{A.4})$$

α est l'albédo de la surface, z est la hauteur du soleil au dessus de l'horizon et Q_o est l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère (la constante solaire corrigée suivant la distance de la terre au soleil). On peut écrire $\cos(z)$ de la façon suivante :

$$\cos(z) = \sin(l) \sin(\delta) + \cos(l) \cos(\delta) \cos(h) \quad (\text{A.5})$$

où l est la latitude, δ l'inclinaison solaire et h l'angle horaire.

On a finalement :

$$R_n = R_s - R_l = U' + V' \cos(h) \quad \text{avec} \quad V' > 0 \quad (\text{A.6})$$

où seul $\cos(h)$ dépend de l'heure de la journée.

En utilisant les équations A.1 et A.6, et en supposant que l'ETP est nulle lorsque $R_n < 0$, l'ETP instantanée peut ainsi s'écrire de la façon suivante :

$$ETP = \max(U + V \cos(h), 0) \quad \text{avec} \quad V > 0 \quad (\text{A.7})$$

- Si $U < -V$, alors $ETP_i = 0$
- Si $U > V$, alors $ETP_i = 24 \times U$
- Sinon, on pose $h_0 = \arccos(-U/V)$, et on intègre $U + V \cos(h)$ sur $[-h_0, h_0]$. On obtient alors $ETP_i = 24/\pi(Uh_0 + V \sin(h_0))$

A.1.2 Calcul de l'évaporation réelle

L'évaporation réelle (ETR) est calculée comme étant le minimum entre l'ETP et le potentiel d'évaporation du réservoir d'eau (S) dans le sol :

$$ETR = \min(ETP, S_i) \quad (\text{A.8})$$

avec :

$$S_i = C_w(w_{i-1}/w_{max}) \quad (\text{A.9})$$

où C_w est l'évaporation maximale d'un sol saturé dans des conditions de forte demande, w_{i-1} est la quantité d'eau utile dans le sol au jour $i - 1$ et w_{max} est la quantité maximale d'eau utile que peut contenir le sol (soit la quantité d'eau dans le sol à saturation). De même que pour l'ETP, l'ETR est intégrée suivant l'heure de la journée.

On a finalement la quantité d'eau dans le réservoir au jour i :

$$w_i = \min(w_{i-1} + P_i - ETR_i, w_{max}) \quad (\text{A.10})$$

Ce calcul d'évaporation est une paramétrisation bien plus simple que celle utilisée dans ISBA. D'autre part, le module utilise des moyennes mensuelles qu'il distribue journalièrement alors que dans AOG, ISBA a le même pas de temps que le modèle atmosphérique et prend correctement en compte la variabilité journalière. Dans le cadre du couplage entre AOG et IMAGE, il semblerait intéressant de fournir directement l'ETR, l'ETP et le contenu en eau du sol calculés par ISBA plutôt que les moyennes mensuelles de précipitation et de température.

A.2 Indices climatiques

A partir de ce bilan hydrique et des indices climatiques journaliers de référence, un certain nombre d'indices climatiques dérivés sont calculés (ceux nécessaires à BIOME, et ceux à AEZ). Indices nécessaires pour la végétation naturelle :

- ▶ La température moyenne du mois le plus froid.
- ▶ La température moyenne du mois le plus chaud.
- ▶ Les températures cumulées à partir de 0°C et de 5°C.

Indice nécessaire pour les fourrages :

- ▶ Le cumul de précipitation pour les jours où la température moyenne dépasse 0°C.

Indices nécessaires pour les cultures :

- ▶ La saison de croissance limitée par la température (jours où la température moyenne dépasse 5°C).
- ▶ La saison de croissance limitée par la disponibilité en eau. Elle débute lorsque la précipitation excède la moitié de l'évaporation potentielle et continue jusqu'à ce que le réservoir en eau soit vidé à 90%.
- ▶ La saison de croissance qui est définie par l'intersection des deux périodes précédentes.

Pour calculer la productivité des cultures, le modèle AEZ a besoin de toute une série de valeurs moyennes calculées sur la période de croissance :

- ▶ La température moyenne
- ▶ La température diurne moyenne
- ▶ Le contenu en eau moyen du réservoir d'eau dans le sol
- ▶ La nébulosité moyenne
- ▶ Le taux de photosynthèse moyen dans le cas où le ciel est clair (dépend de la latitude)
- ▶ Le taux de photosynthèse moyen dans le cas où le ciel est couvert (dépend de la latitude)
- ▶ Le coefficient d'humidité dans le sol $\alpha = ETR/ETP$

Annexe B

Calcul des productivités potentielles agricoles

Ce module est l'adaptation directe du projet «Agro-Ecological Zones » (AEZ) réalisé dans le cadre de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). De façon un peu similaire au modèle BIOME pour la végétation naturelle, il permet de calculer quelle serait la productivité de différents types de cultures en fonction du climat observé (Leemans et Solomon, 1993). Ce modèle est basé sur le concept de période de croissance, c'est-à-dire la période de l'année où les conditions de température et d'humidité nécessaires sont réunies. Le modèle AEZ initial a été conçu pour prendre en compte 26 types de cultures différentes (en incluant les différents types de fourrages). Le modèle IMAGE regroupe ces types en 7 catégories de cultures classiques (riz, maïs, céréales de climat tempéré, céréales de climat tropical, légumes, tubercules et oléagineux), et 4 catégories de cultures fournissant des bio-carburants (cane à sucre, maïs, bio-carburants ligneux, et autres carburants non ligneux), plus une catégorie réservée au fourrage.

La productivité d'une culture est définie comme la production nette de biomasse au cours de la saison de croissance réduite d'un coefficient de récolte qui correspond à la proportion du végétal qui est utile (par exemple, pour du blé, cela correspond à la graine). La production nette cumulée de biomasse (B_n) est calculée en fonction de la production brute de biomasse (B_b) et de la respiration (R), au jour j :

$$B_n(j) = B_b(j) - R(j) \quad (\text{B.1})$$

On a la même relation pour les taux journaliers de production nette de biomasse (b_n), de production brute de biomasse (b_b) et de respiration (r). La respiration est décomposée en respiration de croissance (r_c) et respiration de maintenance (r_m) :

$$b_n(j) = b_b(j) - r_m(j) - r_c(j) \quad (\text{B.2})$$

La respiration de croissance est proportionnelle au taux de production brute soit :

$$r_c(j) = 0.28b_b(j) \quad (\text{B.3})$$

et la respiration de maintenance est proportionnelle à la production cumulée nette de biomasse :

$$r_m(j) = c(T)B_n(j) \quad (\text{B.4})$$

L'équation B.2 se réécrit de la façon suivante :

$$b_n(j) = 0.72b_b(j) - c(T)B_n(j) \quad (\text{B.5})$$

Le modèle AEZ réalise un bilan de ces quantités au moment (j_{max}) de plus fort taux de croissance nette ($b_n(j_{max}) = \max(b_n(j))$), et repose sur les hypothèses suivantes :

- ▶ le taux moyen de production nette (\bar{b}_n) au cours du cycle végétatif vaut la moitié du taux maximum de production nette, soit :

$$\bar{b}_n = 0.5 \times b_n(j_{max}) \quad (\text{B.6})$$

Après intégration sur la durée N du cycle végétatif :

$$B_n = 0.5N \times b_n(j_{max}) \quad (\text{B.7})$$

- ▶ on suppose que le taux de production nette suit une loi normale, et on a ainsi la production nette au moment de développement maximal vaut la moitié de la production nette totale :

$$B_n(j_{max}) = 0.5 \times B_n \quad (\text{B.8})$$

Il vient donc si l'on écrit l'équation B.5 à l'instant (j_{max}) :

$$b_n(j_{max}) = 0.72b_b(j_{max}) - c(T) \times B_n(j_{max}) \quad (\text{B.9})$$

soit finalement avec B.7 et B.8,

$$B_n = \frac{0.36}{1/N + 0.25c(T)} b_b(j_{max}) \quad (\text{B.10})$$

Pour tous les types de cultures, la fonction $c(T)$ est une fonction quadratique de T :

$$c(T) = c_{30}(0.0044 + 0.0019T + 0.001T^2) \quad (\text{B.11})$$

où c_{30} correspond à c à 30°C et vaut 0.0283 pour les légumineux et 0.0108 pour les autres types de cultures.

Le taux maximum de production brute de biomasse $b_b(j_{max})$ est relié au taux maximum d'échange en CO₂ par les feuilles (P_m) suivant la formule suivante :

$$b_b(j_{max}) = Fb_o h(P_m) + (1 - F)b_c g(P_m) \quad (\text{B.12})$$

où F est la fraction de ciel nuageux, b_o la production brute de matière sèche d'une culture étalon à un endroit donné sous un ciel couvert et b_c la production brute de matière sèche d'une culture étalon sous un ciel entièrement dégagé. b_o et b_c sont calculés à partir de cycles annuels moyens de ces variables pour chaque type de culture et sont intégrés sur la saison de croissance en chaque point de grille. $h(P_m)$ et $g(P_m)$ sont des expressions linéaires de P_m identiques pour tous les végétaux :

$$\text{si } P_m > 20\text{kg.ha}^{-1}.\text{hr}^{-1} \quad \begin{cases} h(P_m) = 0.8 + 0.01P_m \\ g(P_m) = 0.5 + 0.025P_m \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

$$\text{si } P_m < 20\text{kg.ha}^{-1}.\text{hr}^{-1} \quad \begin{cases} h(P_m) = 0.5 + 0.0025P_m \\ g(P_m) = 0.05P_m \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

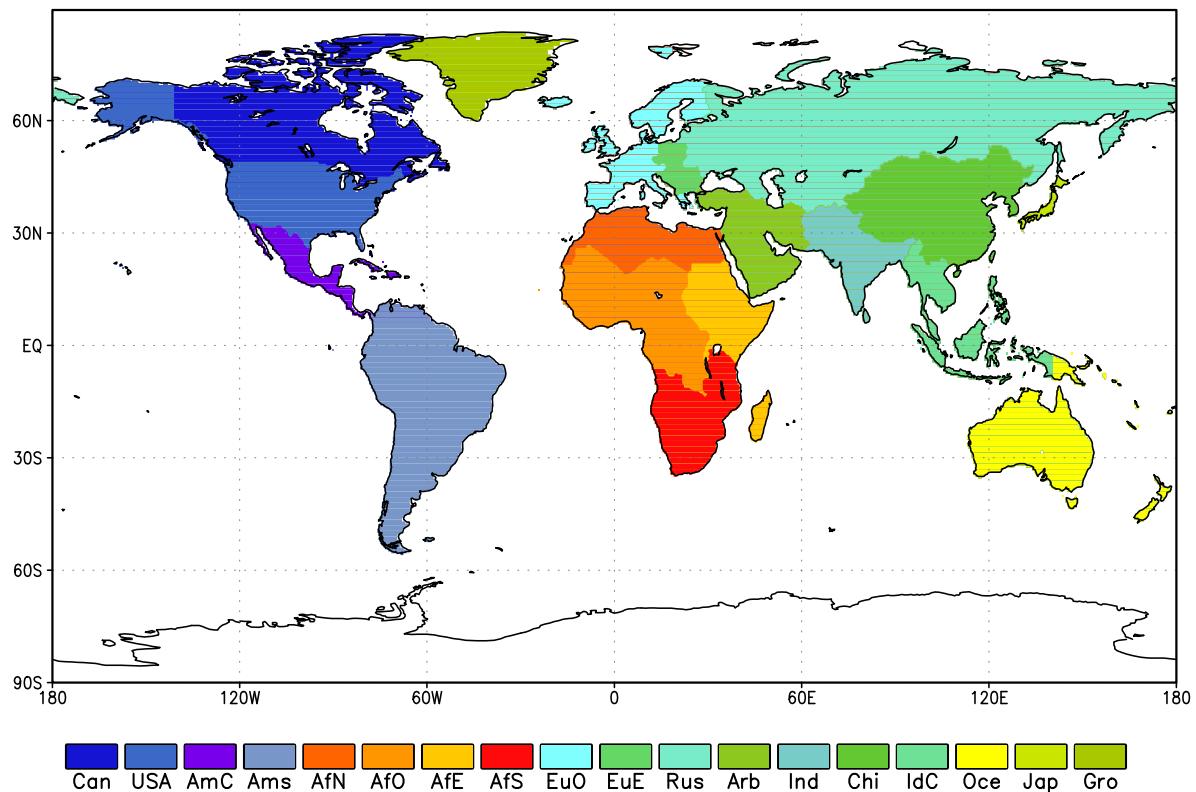
P_m , le taux maximum de photosynthèse est une fonction de la température en forme de cloche (de type réaction enzymatique). La photosynthèse a donc une température de rendement maximum. Dans notre modèle, P_m est tabulé en fonction du type de culture (C₃, C₄,...) et de la température moyenne de la saison de croissance ; on lui applique un coefficient en fonction de la concentration en CO₂ atmosphérique pour prendre en compte l'effet de fertilisation par le CO₂.

Pour les fourrages, la productivité est fonction du cumul de précipitations pour les jours où la température moyenne est supérieure à 0°C.

Dans le modèle IMAGE2.2, la productivité est calculée dans le cas où les cultures ne sont pas irriguées et dans le cas où elles le sont. Dans ce dernier cas, on considère que l'évaporation par le végétal a lieu au taux potentiel et que la saison de croissance est uniquement limitée par la température.

Annexe C

Régions IMAGE



Annexe D

Paramètres de la végétation

	<i>Cultures</i>	<i>Pâtures</i>	<i>Toundra</i>	<i>Toundra arbustive</i>	<i>F. Boréale</i>	<i>F. de conifères</i>	<i>F. mixte tempérée</i>	<i>F. décidue tempérée</i>	<i>F. mixte chaude</i>	<i>Savane</i>	<i>Arbustes</i>	<i>Savane</i>	<i>Savane boisée</i>	<i>F. Tropicale</i>
--	-----------------	----------------	----------------	--------------------------	-------------------	------------------------	--------------------------	----------------------------	------------------------	---------------	-----------------	---------------	----------------------	---------------------

ALBÉDO

Amérique Nord	0.178	0.185	0.196	0.178	0.118	0.118	0.127	0.140	0.134	0.192	0.179	0.172	0.154	0.136
Amérique Sud	0.195	0.183	0.195	0.186	0.121	0.122	0.129	0.139	0.161	0.197	0.186	0.177	0.144	0.134
Afrique	0.191	0.190	0.195	0.186	0.121	0.122	0.129	0.139	0.140	0.198	0.190	0.175	0.160	0.137
Europe	0.183	0.188	0.195	0.186	0.121	0.122	0.129	0.139	0.140	0.197	0.186	0.174	0.149	0.136
Asie	0.182	0.187	0.194	0.190	0.121	0.127	0.131	0.139	0.129	0.198	0.187	0.172	0.149	0.136
Océanie	0.188	0.190	0.195	0.186	0.121	0.122	0.129	0.139	0.139	0.198	0.187	0.166	0.148	0.140

RÉSISTANCE STOMATIQUE MINIMALE (s.m⁻¹)

Amérique Nord	48.	67.	44.	56.	127.	132.	124.	108.	138.	48.	95.	151.	179.	237.
Amérique Sud	80.	120.	45.	51.	123.	125.	114.	104.	150.	46.	87.	144.	221.	242.
Afrique	68.	99.	45.	51.	123.	125.	114.	104.	146.	50.	92.	145.	183.	236.
Europe	53.	76.	45.	51.	123.	125.	114.	104.	146.	46.	91.	142.	204.	237.
Asie	48.	49.	45.	48.	120.	117.	103.	104.	120.	42.	72.	116.	204.	237.
Océanie	65.	83.	45.	51.	123.	125.	114.	104.	187.	46.	103.	145.	169.	228.

LONGUEUR DE RUGOSITÉ MINIMALE (m)

Amérique Nord	0.08	0.16	0.01	0.09	1.60	1.70	1.67	1.44	1.11	0.04	0.31	0.77	1.89	3.53
Amérique Sud	0.12	0.40	0.02	0.05	1.55	1.60	1.48	1.34	1.84	0.03	0.20	0.63	3.20	3.71
Afrique	0.09	0.10	0.02	0.05	1.55	1.60	1.48	1.34	1.68	0.02	0.08	0.39	2.03	3.50
Europe	0.10	0.13	0.02	0.05	1.55	1.60	1.48	1.34	1.68	0.03	0.18	0.54	2.74	3.53
Asie	0.08	0.06	0.02	0.03	1.53	1.48	1.22	1.34	1.22	0.02	0.18	0.64	2.74	3.53
Océanie	0.25	0.10	0.02	0.05	1.55	1.60	1.48	1.34	2.48	0.02	0.25	0.92	1.60	3.15

LONGUEUR DE RUGOSITÉ MAXIMALE (m)

Amérique Nord	0.25	0.23	0.03	0.14	1.62	1.72	1.70	1.50	1.22	0.07	0.35	0.78	1.90	3.53
Amérique Sud	0.21	0.43	0.04	0.09	1.58	1.63	1.53	1.40	1.86	0.04	0.22	0.65	3.21	3.71
Afrique	0.12	0.13	0.04	0.09	1.58	1.63	1.53	1.40	1.71	0.03	0.10	0.44	2.05	3.50
Europe	0.20	0.15	0.04	0.09	1.58	1.63	1.53	1.40	1.71	0.04	0.18	0.56	2.75	3.53
Asie	0.19	0.13	0.05	0.06	1.56	1.52	1.29	1.40	1.28	0.04	0.21	0.71	2.75	3.53
Océanie	0.36	0.11	0.04	0.09	1.58	1.63	1.53	1.40	2.49	0.02	0.26	0.97	1.62	3.16

PROFONDEUR RACINAIRE (m)

Amérique Nord	1.5	1.6	0.6	1.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.0	1.7	2.3	3.4	7.0	
Amérique Sud	1.5	1.8	0.6	0.9	1.9	1.9	1.9	2.8	0.9	1.3	1.9	6.0	7.5	
Afrique	1.4	1.2	0.6	0.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.6	0.7	1.1	1.8	3.9	7.0
Europe	1.5	1.2	0.6	0.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.6	0.7	1.3	1.9	5.1	7.0
Asie	1.5	1.1	0.7	0.7	1.8	1.8	1.8	1.9	2.3	0.6	1.4	2.2	5.1	7.0
Océanie	1.8	1.0	0.6	0.9	1.9	1.9	1.9	1.9	3.6	0.6	1.2	2.5	3.4	6.2

	Cultures	Prairies	Toundra	Toundra arbustive	P. Boréale	P. de conifères	P. mixte tempérée	P. désertique tempérée	P. mixte chaude	Steppe	Arbustes	Savane	Savane boisée	P. Tropicale
--	----------	----------	---------	-------------------	------------	-----------------	-------------------	------------------------	-----------------	--------	----------	--------	---------------	--------------

PROPORTION MINIMALE DE VÉGÉTATION

Amérique Nord	0.23	0.74	0.47	0.75	0.94	0.93	0.85	0.75	0.74	0.59	0.78	0.94	0.95	0.98
Amérique Sud	0.74	0.82	0.53	0.69	0.92	0.91	0.82	0.74	0.90	0.64	0.77	0.86	0.96	0.98
Afrique	0.59	0.68	0.53	0.69	0.92	0.91	0.82	0.74	0.80	0.35	0.63	0.85	0.91	0.98
Europe	0.41	0.69	0.53	0.69	0.92	0.91	0.82	0.74	0.80	0.47	0.69	0.83	0.93	0.98
Asie	0.38	0.63	0.58	0.66	0.92	0.89	0.79	0.74	0.69	0.43	0.63	0.62	0.93	0.98
Océanie	0.56	0.65	0.53	0.69	0.92	0.91	0.82	0.74	0.88	0.35	0.59	0.72	0.80	0.97

PROPORTION MAXIMALE DE VÉGÉTATION

Amérique Nord	0.91	0.88	0.47	0.75	0.94	0.95	0.94	0.94	0.93	0.62	0.84	0.95	0.96	0.98
Amérique Sud	0.86	0.84	0.53	0.69	0.94	0.95	0.94	0.93	0.91	0.64	0.77	0.87	0.96	0.98
Afrique	0.67	0.70	0.53	0.69	0.94	0.95	0.94	0.93	0.90	0.37	0.64	0.87	0.94	0.98
Europe	0.83	0.74	0.53	0.69	0.94	0.95	0.94	0.93	0.90	0.49	0.70	0.87	0.94	0.98
Asie	0.84	0.79	0.58	0.66	0.95	0.94	0.93	0.93	0.88	0.46	0.72	0.83	0.94	0.98
Océanie	0.87	0.65	0.53	0.69	0.94	0.95	0.94	0.93	0.95	0.35	0.59	0.87	0.90	0.98

INDICE FOLIAIRE MINIMAL ($m^2.m^{-2}$)

Amérique Nord	0.2	0.9	0.1	0.3	1.5	1.4	1.1	0.7	1.8	0.4	1.1	2.9	4.1	5.2
Amérique Sud	1.8	1.5	0.2	0.2	1.3	1.3	1.1	0.9	3.0	0.5	0.9	1.7	4.8	5.7
Afrique	1.2	0.8	0.2	0.2	1.3	1.3	1.1	0.9	3.1	0.3	0.7	1.5	2.9	4.7
Europe	0.8	1.0	0.2	0.2	1.3	1.3	1.1	0.9	3.1	0.3	1.2	2.1	4.2	5.2
Asie	0.6	0.4	0.2	0.2	1.1	1.1	0.9	0.9	2.6	0.2	0.8	1.6	4.2	5.2
Océanie	1.4	0.8	0.2	0.2	1.3	1.3	1.1	0.9	3.9	0.4	1.3	2.3	3.3	4.5

INDICE FOLIAIRE MAXIMAL ($m^2.m^{-2}$)

Amérique Nord	3.8	2.5	0.8	1.9	4.5	4.5	4.2	4.1	3.8	1.4	2.0	3.1	4.4	5.5
Amérique Sud	3.1	2.1	0.9	1.5	4.5	4.5	4.1	3.9	3.9	0.6	1.5	2.4	5.0	5.7
Afrique	1.8	1.6	0.9	1.5	4.5	4.5	4.1	3.9	3.7	0.5	1.4	3.0	3.9	5.3
Europe	3.0	1.6	0.9	1.5	4.5	4.5	4.1	3.9	3.7	0.8	1.3	2.5	4.5	5.5
Asie	3.0	2.1	1.1	1.4	4.5	4.5	4.2	3.9	3.8	0.8	1.7	2.9	4.5	5.5
Océanie	3.2	1.1	0.9	1.5	4.5	4.5	4.1	3.9	4.4	0.6	1.4	3.1	4.0	5.2

TYPE DE VÉGÉTATION (Haute ou Basse)

Global	B	B	B	B	H	H	H	H	H	B	B	B	H	H
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

TAB. D.1 - Valeurs des paramètres du modèle de surface ISBA pour chacun des types de la classification IMAGE. L'émissivité de la végétation est prise égale à 0.97, et le coefficient thermique vaut $2.10^{-5} K.m^2.J^{-1}$ pour la végétation basse (B) et $10^{-5} K.m^2.J^{-1}$ pour la végétation haute (H).

Annexe E

Tropical Deforestation and climate variability

Article publié dans Climate Dynamics

Voldoire A., J.-F. Royer, 2004 : Tropical deforestation and climate variability. Clim. Dyn., vol 22, n°8, pp 857-874, DOI10.1007/s00382-004-0423-z.

Annexe F

Climate sensitivity to tropical land surface changes with coupled versus prescribed SSTs

Article publié dans Climate Dynamics

Voldoire A., J.-F. Royer, 2005 : Climate sensitivity to tropical land surface changes with coupled versus prescribed SSTs. Clim. Dyn., 24 (7-8) : 843-862, DOI10.1007/s00382-005-0014-7.

**TITLE : Introducing land-cover and land-use changes
in a climate scenario of the 21st century.**

ABSTRACT

The main objective of this work has been to run a climate simulation of the 21st century that includes not only greenhouse gases and aerosols emitted by human activity but also land-use and land-cover changes. To achieve this goal, the integrated impact model IMAGE2.2 (developed at RIVM, The Netherlands) was used, which simulates the evolution of greenhouse gases concentrations as well as land-cover changes. This model has been coupled to the general circulation model ARPEGE/OPA provided by the CNRM. Before coupling the models, sensitivity experiments with each model have been performed to test their respective sensitivity to the forcing of the other. Ultimately, a simulation with the two models coupled together has shown that interactions between climate and vegetation are not of primary importance for century scale studies.

AUTEUR : VOLDOIRE Aurore

TITRE : Prise en compte des changements de végétation dans un scénario climatique du XXI^{ème} siècle

DIRECTEUR DE THESE : PETTRE Paul

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Salle de conférence du CNRM/Météo-France, le 31 mars 2005

RESUME

Le but principal de cette thèse était de réaliser une simulation du climat du XXI^{ème} siècle, en tenant compte non seulement des émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols produites par l'activité humaine, mais aussi des changements de végétation résultant du développement démographique et économique et des rétroactions climatiques. Pour réaliser cette simulation, il a été décidé d'utiliser le modèle d'impact intégré IMAGE2.2 (développé au RIVM, en Hollande) qui simule l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre et de la végétation, et de le coupler au modèle climatique de circulation générale ARPEGE/OPA, disponible au CNRM. Avant de réaliser la simulation couplée proprement dite, des expériences de sensibilité de chacun des deux modèles au forçage produit par l'autre ont été réalisées. Finalement, la simulation couplée a montré qu'à l'échelle du siècle les interactions entre le climat et la végétation sont relativement peu importantes.

**MOTS CLEFS : Changement climatique - Végétation - Utilisation des sols
- Simulation numérique - Modèles couplés**

DISCIPLINE : Physique de l'atmosphère

**LABORATOIRE : Centre National de Recherches Météorologiques,
Météo-France
42 av G. Coriolis, 31057 TOULOUSE Cedex, FRANCE**