



**THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS VI -
PIERRE ET MARIE CURIE**

Ecole Doctorale : Sciences de l'Environnement d'Ile-de-France (ED129)

Présentée par

Alexis BERG

Pour obtenir le grade de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITE PARIS VI - PIERRE ET MARIE CURIE

Thèse effectuée au :

Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques
(LOCEAN)

Unité mixte CNRS-UPMC-IRD-MNHN

Ainsi qu'au :

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE)

Unité mixte CEA-CNRS-UVSQ

Titre de la thèse :

***Représentation des cultures tropicales dans le modèle de
surface continentale ORCHIDEE : apport à l'étude des
interactions climat/agriculture***

Soutenue le 7 mars 2011 devant le jury composé de

Hervé Le Treut
Wolfgang Cramer

Pierluigi Calanca

Alberte Bondeau

Andrew Challinor

Michael Dingkuhn

Nathalie de Noblet-Ducoudré

Benjamin Sultan

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Examineur

Examineur

Directrice de thèse

Co-directeur de thèse

Résumé

Dans cette thèse, on a introduit une représentation des zones cultivées tropicales au sein du modèle de surface de l'IPSL, ORCHIDEE, afin d'étudier les interactions climat/agriculture en région tropicale. La nouvelle version du modèle, appelée ORCHIDEE-mil, est validée à l'échelle locale et régionale sur l'Afrique de l'Ouest et l'Inde. L'analyse de la variabilité des rendements simulés par rapport aux données nationales montre que le modèle représente bien l'impact du climat sur la productivité agricole à grande échelle. Toutefois le modèle surestime de façon importante les rendements moyens observés, du fait de l'écart existant dans ces régions entre rendements climatiques potentiels, tels que simulés par le modèle, et rendements paysans.

L'impact d'une meilleure représentation des zones cultivées tropicales sur la simulation des interactions surface/atmosphère et du climat est analysé à l'aide d'une expérience de couplage asynchrone. Cette simulation ne met en évidence qu'un impact limité de la modification des flux surface/atmosphère, induite par le changement de végétation, sur le climat simulé: les limitations en sont discutées.

ORCHIDEE-mil est finalement utilisé pour projeter l'évolution de la productivité agricole potentielle d'ici la fin du siècle sur la zone Afrique/Inde dans le contexte du changement climatique, à l'aide des projections climatiques des modèles du GIEC. Il en ressort un impact en moyenne modérément négatif, entre -29 et +11% selon ces projections. Cet impact doit être mis en regard des possibilités d'adaptation des pratiques culturelles et d'amélioration des rendements qui existent aujourd'hui dans ces régions.

Mots-clés : Agriculture, Changement climatique, Tropiques, Impact, Interactions surface-atmosphère, modélisation.

Title : Including tropical croplands in the IPSL land surface model, ORCHIDEE: contribution to the study of crop/climate interactions

Abstract

In this work we introduced a representation of tropical croplands in IPSL's land surface model, ORCHIDEE, in order to study crop/climate interactions in the Tropics. The new version, called ORCHIDEE-mil, is validated at the local and regional scale over West Africa and India. The analysis of the variability of simulated yields against national data shows that the model correctly simulates the large-scale impact of climate on crop productivity; however, the model overestimates mean observed yields, as a result of the yield gap in those regions between climatic potential yields – such as simulated by the model – and actual, on-farm yields.

We analyze the impact of a more realistic representation of tropical croplands on the simulation of land-atmosphere interactions and climate, with an asynchronously coupled simulation. This experiment shows only a limited impact on climate of the modification of land-atmosphere interactions induced by the change in simulated vegetation: the limitations of this experiment are discussed. Finally, ORCHIDEE-mil is used, forced by IPCC climate projections, to project the evolution of potential crop yields over Africa and India in the context of climate change. Results show a moderately negative impact over the study domain, between -29 and +11% across climate projections. This impact must be considered in the light of adaptation possibilities, as well as the current potential of yield increase in those regions.

Keywords : Agriculture, Climate change, Tropics, Impacts, Land-atmosphere interactions, modelling.

Remerciements

A l'heure de terminer cette thèse, je tiens naturellement à effectuer un certain nombre de remerciements.

Je remercie en premier lieu ma directrice de thèse, Nathalie de Noblet, d'avoir accepté, à l'époque, que je monte un projet de thèse au LSCE et d'en être directrice, alors même que j'avais refusé un autre projet sous sa direction quelques mois auparavant – débuts peu orthodoxes. Je remercie Nathalie pour la confiance qu'elle m'a ainsi accordée, la disponibilité qu'elle a ensuite montrée à mon égard en même temps que la grande liberté de travail qu'elle m'a laissée. J'ai beaucoup apprécié sa constante énergie et sa bonne humeur, son enthousiasme, communicatifs – son ouverture à la discussion également, ainsi que son souci de valoriser ses étudiants et leur travail.

Je remercie également mon co-directeur Benjamin Sultan - qui, au-delà de la thèse, m'encadre en fait depuis mon entrée au LOCEAN : stage de Master, CDDs, thèse... Je le remercie de m'avoir fait ainsi confiance depuis le début - peut-être même, si je m'en souviens bien, d'avoir su me pousser au bon moment à monter concrètement ce projet de thèse – et de m'avoir depuis lors guidé et aidé presque quotidiennement dans mon travail. Le duo d'encadrants ainsi constitué avec Nathalie s'est révélé très complémentaire, efficace, et au final on ne peut plus agréable à vivre pour le thésard que j'étais : ce fut véritablement une chance pour moi, professionnellement et humainement, que de pouvoir travailler de la sorte avec eux.

Je dois remercier également tous ceux, au LOCEAN comme au LSCE, qui à un moment ou un autre ont pu m'aider ou contribuer, directement ou indirectement, à ce travail de thèse – ne serait-ce que lorsque je venais les solliciter avec mes (nombreuses) questions... Beaucoup devraient être cités ici, mais me viennent peut-être en particulier à l'esprit les noms de Serge Janicot au LOCEAN, de Nicolas Viovy, Nicolas Vuichard et Pascal Smith au LSCE (pour les diverses considérations sur les agro-écosystèmes), ainsi que de Martial Mancip à l'IPSL, pour l'aide pratique avec le modèle ORCHIDEE.

Cette thèse s'est également appuyée sur diverses collaborations, notamment avec l'équipe ECOTROP du CIRAD - en particulier Christian Baron – qui a bien voulu nous laisser maltraiter leur modèle SARRAH ; ainsi que l'équipe de Bernard Cappelaere au laboratoire Hydrosiences de Montpellier (avec Nicolas Boulain et David Ramier en particulier), pour l'utilisation des mesures sur site au Niger. Elle emprunte également quelques éléments au travail de Pierre Brender, au LSCE, ainsi qu'à celui de Philippe Roudier au CIRED. Qu'ils en soient donc ici tous remerciés.

Je tiens aussi à remercier Tom Osborne, de l'Université de Reading, et Alberte Bondeau, du PIK de Potsdam, d'avoir pris part à mon comité de thèse (même si je l'ai trop peu réuni) – ainsi que les membres de mon jury de thèse, pour avoir accepté et pris le temps d'évaluer ce travail et de venir, souvent d'assez loin, participer à la soutenance.

Je dois remercier également, à l'origine, la Région Ile-de-France, d'avoir accepté et financé ce travail de thèse : très honnêtement, je ne sais si j'aurais pu, à l'époque, obtenir un autre type de financement dans d'aussi bonnes conditions. J'ai donc pleinement bénéficié de l'effort de financement de la recherche par la Région.

Enfin j'ai eu la chance de pouvoir travailler ces 3 années à cheval sur deux laboratoires, le LSCE et le LOCEAN – ce qui me fait donc au final deux fois plus de personnes, et en particulier de collègues thésards, à remercier pour les bons moments passés en leur compagnie et la bonne ambiance qu'ils ont participé à faire régner dans ces labos. Ici aussi il y aurait trop de noms à citer - mais qu'ils sachent que, bien que d'un naturel parfois discret ou peu expansif, j'ai eu beaucoup de plaisir à les côtoyer pendant ces années, et que cela a constitué une part importante du plaisir que j'ai pu avoir à faire cette thèse.

Table des matières

INTRODUCTION	11
1. Changement climatique et agriculture : des problématiques intrinsèquement liées.....	11
1.1 Impact du changement climatique sur l'agriculture	12
1.2 Impact de l'agriculture sur le climat.....	14
2. Vers une modélisation intégrée du système climat-agriculture.....	17
2.1 La modélisation agronomique des impacts du climat sur l'agriculture	18
2.2 La prise en compte des surfaces continentales dans les modèles de climat.....	22
2.3 Intégrer les agrosystèmes dans les modèles de biosphère	25
3. Positionnement et objectifs de la thèse	28
3.1 La modélisation des cultures au sein d'ORCHIDEE.....	28
3.2 Objectifs et plan de la thèse	30
 I. DEVELOPPEMENT D'UNE REPRESENTATION DES CULTURES TROPICALES	
 DANS LE MODELE ORCHIDEE ET COMPARAISONS SUR SITE	33
 1. ORCHIDEE et SARRAH	33
1.1 Simulation de la biosphère par ORCHIDEE	33
1.2 Simulation des cultures par SARRAH.	36
1.3 Résumé comparaison ORCHIDEE/ SARRAH	40
2. Nouvelle représentation des cultures tropicales dans ORCHIDEE.....	41
2.1 Comparaison des deux modèles sur le site de Bambey	41
2.2 Modifications apportées à ORCHIDEE	43
2.3 Simulation d'ORCHIDEE-mil sur le site de Bambey	48
3. Comparaison aux données du site de Wankama	50
3.1 Le site de Wankama	50
3.2 Simulations.....	51
3.3 Comparaison des biomasses et flux de carbone	53
3.4 Comparaison des flux d'énergie	59

3.5 Comparaison végétation naturelle/cultivée	63
---	----

II. APPLICATION D'ORCHIDEE-MIL A L'ECHELLE REGIONALE : VALIDITE DES RENDEMENTS SIMULES A GRANDE ECHELLE..... 71

1. “Including tropical croplands in a terrestrial biosphere model: application to West Africa”, Climatic Change	71
1.1 Article.....	71
1.2 Discussion	101
2. “What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa?” Geophysical Research Letters.....	104
3. Evaluation des rendements simulés, et de leur variabilité interannuelle, sur l'Inde.....	111
4. Application à la simulation d'autres cultures.....	117
5. Discussion : modélisation mécaniste et modélisation statistique.....	123
5.1 Limites de la modélisation agronomique statistique à grande échelle.....	124
5.2 Modélisation agronomique mécaniste à grande échelle et prise en compte de la variabilité climatique intrasaisonnière.....	128

III. APPORT D'ORCHIDEE-MIL A L'ETUDE DES INTERACTIONS CLIMAT/AGRICULTURE..... 133

1. Impact d'une meilleure représentation des zones cultivées sur le climat simulé par LMDz en Afrique de l'Ouest	134
1.1 Modifications des interactions surface/atmosphère dans ORCHIDEE-mil	134
1.2 Couplage asynchrone avec LMDz.....	137
2. “Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions”, submitted to Agricultural and Forest Meteorology	151
1. Introduction	152
2. Models, Data & Methods	153
3. Results	156
4. Discussion	158

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	177
RÉFÉRENCES	187
ANNEXE: “THE IMPACT OF FUTURE CLIMATE CHANGE ON WEST AFRICAN CROP YIELDS: WHAT DOES THE RECENT LITERATURE SAY?” IN REVISION FOR GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE	201

Introduction

1. Changement climatique et agriculture : des problématiques intrinsèquement liées

Parmi les grandes problématiques, qui, en termes d'environnement et de ressources, se posent à l'Homme en ce début de XXI^{ème} siècle, les questions du changement climatique et de l'agriculture sont sans aucun doute de celles qui apparaissent parmi les plus préoccupantes. Le 4^{ème} rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), en 2007, a ainsi établi comme « très probable » le fait que les activités humaines – principalement à travers l'utilisation des combustibles fossiles et l'émission de gaz à effet de serre (GES) - aient causé la majeure partie du réchauffement global, inéquivoque, observé sur la seconde moitié du XX^{ème} siècle, et prévoit ainsi que « *la poursuite des émissions de GES au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI^e siècle* ». Un tel changement climatique s'accompagnerait d'impacts potentiellement dramatiques sur le niveau marin, le fonctionnement des écosystèmes, les ressources en eaux - et donc *in fine* sur les sociétés humaines. Bien que le problème soit posé, avec une acuité et un degré de certitude scientifique croissants, depuis maintenant plus de deux décennies, une réponse globale et coordonnée des Etats pour faire face à ce « défi climatique », notamment via la réduction des émissions de GES et la mise en place de politiques d'adaptation, reste encore à trouver. La question agricole, quant à elle, occupe également de plus en plus régulièrement le devant de la scène scientifique, politique et médiatique. En effet, par l'espace qu'elle occupe à la surface du globe, l'agriculture est sans aucun doute l'activité par laquelle l'homme exerce le plus de pression sur l'environnement : elle se trouve ainsi aujourd'hui à la croisée d'un certain nombre de problématiques environnementales majeures, comme la déforestation tropicale et ses conséquences (émissions de GES, perte de biodiversité, érosion/dégradation des sols), le déclin des ressources en eaux dans certaines régions, la pollution chimique de l'environnement et particulièrement des eaux de surface. Qui plus est, si pendant le dernier siècle l'augmentation de la production alimentaire a d'une façon générale permis de faire face à l'explosion démographique mondiale (de 1.6 milliard en 1900 à 6.8 milliard d'habitants aujourd'hui), les émeutes de la faim de 2008 – certes dans un contexte de spéculation économique, mais aussi de production insuffisante et de baisse des stocks alimentaires - ont cuisamment remis à l'ordre du jour la question de l'avenir de la production agricole mondiale, et de sa capacité à faire face, sans un coût écologique exorbitant, à l'augmentation attendue de la population mondiale à environ 9 milliards d'individus d'ici 2050 (ONU, 2006).

Loin d'être clairement séparées, ces deux problématiques, changement climatique et avenir de l'agriculture, sont, comme beaucoup de problématiques globales d'environnement et de ressources, intimement liées. Plus précisément, analyser plus avant les liens entre changement climatique et agriculture, à l'échelle globale, amène à considérer deux problématiques complémentaires : d'une part - et peut-être de la façon la plus intuitive – la problématique de l'impact du changement climatique à venir sur la production agricole mondiale et la sécurité alimentaire au cours des prochaines décennies, en particulier, comme il a été dit, dans un contexte de forte augmentation de la population mondiale ; d'autre part, l'impact que les activités agricoles, fortement consommatrices d'espaces et de ressources naturels (terres, eau) et qui modifient à grande échelle les échanges de matière et d'énergie entre les surfaces continentales et l'atmosphère, peuvent avoir, réciproquement, sur l'évolution du climat.

1.1 Impact du changement climatique sur l'agriculture

La problématique de l'impact sur la production agricole est probablement l'une des conséquences du changement climatique qui vient en premier à l'esprit lorsqu'on évoque les impacts du changement climatique sur les sociétés humaines. En effet, il est assez intuitif pour chacun que le rendement d'une culture donnée, en un lieu donné, dépend au moins en partie des conditions météorologiques durant la saison de croissance de cette culture. A plus grande échelle, on peut constater que la variabilité interannuelle de la production agricole dans différentes régions du monde reflète également les variations interannuelles des conditions météorologiques régionales (Lobell et Field 2007). Régulièrement, des épisodes météorologiques régionaux particuliers viennent ainsi affecter la production agricole de telle ou telle région, comme récemment encore, pour prendre un exemple extrême, la canicule en Russie à l'été 2010, qui y a gravement réduit la production céréalière (voir aussi Battisti et Naylor 2009). Et si les niveaux moyens actuels de productivité agricole à travers ces différentes régions restent bien entendu grandement déterminés par des facteurs non-climatiques, tels que les différents niveaux d'intensification des pratiques agricoles (utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires, mécanisation, irrigation), les politiques agricoles des différents pays, ou encore les conditions pédologiques, les conditions climatiques moyennes participent aussi à déterminer le potentiel agricole des différentes régions. Certains utilisent ainsi le terme de « ressources climatiques pour l'agriculture ». Pour une région donnée, toute évolution de ces ressources climatiques, dans le cadre d'un changement climatique global, est donc à même, toutes choses égales par ailleurs, de modifier – en positif ou en négatif – le potentiel productif agricole de cette région.

L'augmentation de la productivité agricole au cours des dernières décennies, à l'échelle du globe, a principalement été le résultat de l'intensification de l'agriculture, essentiellement dans les pays développés mais aussi dans les pays en développement au cours de la Révolution Verte (fig.1) : l'utilisation d'engrais, de produits phytosanitaires, l'amélioration variétale, l'irrigation, mais aussi les mesures institutionnelles et économiques telles que la mise en place de politiques agricoles incitatives et rémunératrices pour les agriculteurs, ont permis d'augmenter très fortement les rendements moyens des principales cultures. On peut constater (fig.1) que les surfaces cultivées, elles, n'ont depuis l'après-guerre pas beaucoup augmenté en comparaison aux décennies précédentes.

Si les limites, en particulier les coûts environnementaux, de ce type d'agriculture, aujourd'hui appelée « conventionnelle » (intensive), sont aujourd'hui bien documentées (par exemple pollution des eaux par les résidus de produits fertilisants et phytosanitaires, surexploitation de certaines nappes phréatiques, appauvrissement/érosion/salinisation des sols), cette intensification a néanmoins permis d'augmenter fortement la production agricole, et de soutenir ainsi l'augmentation de la population mondiale et de sa consommation de produits alimentaires et textiles tout en réduisant la consommation marginale de nouvelles surfaces par les activités agricoles (fig.1). Certains défendent donc l'idée qu'en « épargnant » des espaces naturels, l'intensification de l'agriculture présente au final un bilan écologique largement positif (Borlaug 2002). Du point de vue des impacts du climat sur l'agriculture, cet accroissement de la productivité agricole, d'origine anthropique, tend à masquer les impacts éventuels, en termes de rendements, qu'ont pu avoir les modifications de l'environnement au cours des dernières décennies, i.e., principalement, le début de réchauffement climatique observé (0.7°C au cours du XXème siècle) et l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. En moyenne sur l'Europe, entre 1950 et 2000, Gervois et al. (2008) chiffrent par exemple l'influence de ces deux derniers facteurs à respectivement 0 et +11%, pour une évolution totale des rendements comprise entre +300 à +400%.

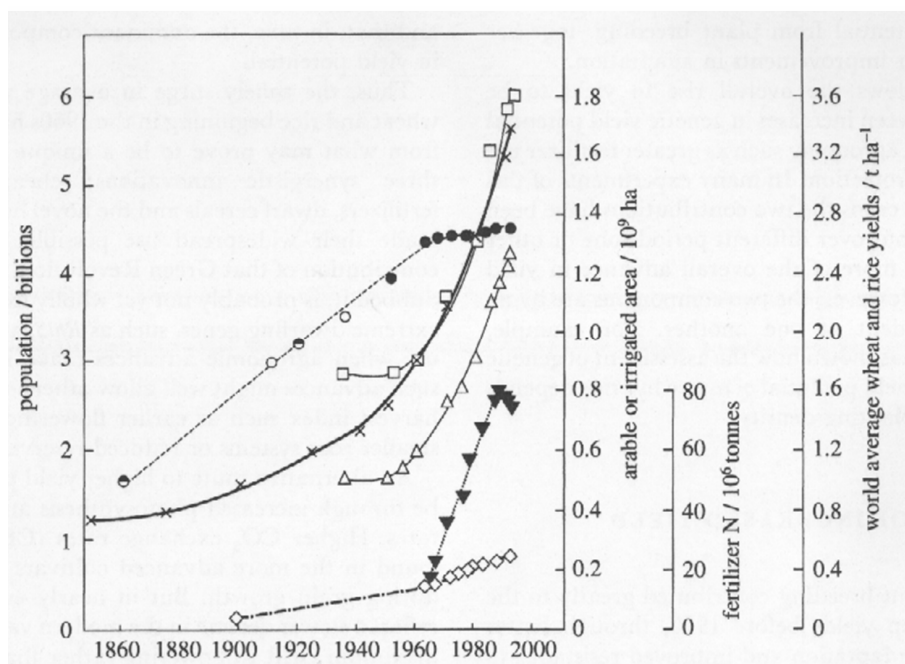


Fig.1 : Evolution de la population mondiale (croix pleines), des surfaces arables (ronds pleins et vides), des rendements moyens en blé (triangles vides) et riz (carrés vides), des surfaces irriguées (losanges vides), et de l'utilisation de fertilisants azotés (triangles pleins inversés). Figure tirée de Evans et al. (1997).

Cela pourrait donc laisser penser que l'évolution future du climat ne sera finalement que de peu d'importance pour l'évolution de la production agricole globale : l'intensification des pratiques culturales permettrait en tout état de cause une augmentation de la productivité à même de dominer tout impact climatique. Toutefois, il ne semble aujourd'hui guère probable que l'avenir de l'agriculture mondiale, au cours des prochaines décennies, consiste simplement en une poursuite à l'identique de l'intensification des pratiques agricoles : les coûts en termes environnementaux de ce type d'agriculture, mais aussi sa dépendance à des ressources non-renouvelables à l'avenir aujourd'hui incertain (ressources fossiles, à travers les intrants azotés et phytosanitaires, issus des produits pétroliers et gaziers ; ressources en phosphore, à travers les fertilisants phosphatés), imposent aujourd'hui de chercher d'autres voies pour parvenir à augmenter la production agricole globale. Résoudre l'équation entre, d'une part, une demande mondiale croissante en produits agricoles alimentaires, textiles et, de plus en plus, énergétiques (agrocarburants), et, d'autre part, une réduction nécessaire de la consommation d'intrants et des coûts environnementaux, conduit une partie de la recherche agronomique actuelle à proposer le concept de « révolution doublement verte » (Griffon et Weber, 1996). Mais surtout, l'ampleur et la rapidité du changement climatique attendu au cours du XXI^{ème} siècle (entre 1.1 et 6.4 °C en température globale, selon les scénarios socio-économiques et les modèles climatiques) sont bien plus importantes que ce qui a pu être observé au cours du siècle passé : les impacts sur l'agriculture risquent donc très probablement d'être significativement plus importants. Qui plus est, au-delà d'un changement climatique moyen, l'augmentation attendue de la variabilité et des extrêmes climatiques (sécheresses, vagues de chaleur, inondations) pourrait exercer une contrainte supplémentaire sur la stabilité de la production agricole, et donc la sécurité alimentaire. Cependant, à l'heure actuelle, l'estimation de l'impact global du réchauffement climatique futur sur l'agriculture reste encore très incertaine, et principalement qualitative : le 4^{ème} rapport du GIEC (2007), faisant le bilan des différentes études d'impact agronomique, indique ainsi que « les projections mondiales indiquent qu'une hausse des températures locales moyennes de l'ordre de 1 à 3°C augmentera le potentiel de la production alimentaire, mais qu'au-delà il

diminuera ». Le rapport distingue les moyennes/hautes latitudes, pour lesquelles « *les rendements agricoles devraient augmenter légèrement [...] pour des augmentations moyennes locales de température jusqu'à 1 à 3°C selon la culture considérée* », qui compenseraient en partie l'évolution dans les basses latitudes, pour lesquelles il indique (avec une « confiance moyenne ») qu'« *en particulier dans des régions saisonnièrement sèches et des régions tropicales, le rendement agricole diminuera si les températures n'augmentent que de 1 à 2°C, ce qui entraînerait un risque accru de famine* ». A posteriori, cela peut s'interpréter assez directement par le fait qu'aux hautes et moyennes latitudes, la productivité végétale est au premier ordre limitée par la température: un réchauffement climatique global, qui serait particulièrement amplifié aux hautes latitudes, peut donc permettre un allongement de la saison de croissance et une augmentation du potentiel productif. Aux basses latitudes, la productivité végétale est davantage contrôlée par la disponibilité en eau (ou le rayonnement pour les régions équatoriales) : une modification des précipitations, même dans le cadre d'un réchauffement plus faible, peut donc avoir des conséquences adverses pour la productivité des écosystèmes cultivés. Néanmoins, ces estimations restent à l'évidence très qualitatives, et tributaires de nombreuses incertitudes : incertitudes d'abord dans les déclinaisons régionales du changement climatique global, particulièrement en termes d'évolution régionale des précipitations aux basses latitudes, pour lesquelles le signe même de l'évolution reste parfois encore inconnu (Douville et al. 2006, Cook et Vizy 2006) ; incertitudes dans la réponse des plantes cultivées aux changements environnementaux : pluie, température, et surtout concentration atmosphérique en CO₂, dont l'effet fertilisant sur la photosynthèse est encore mal cerné (Long et al. 2006, Tubiello et al. 2007, Ainsworth et al. 2008) ; incertitudes, au-delà de la réponse à un changement climatique moyen, quant à l'effet d'une variabilité climatique accrue et en particulier d'une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des événements climatiques extrêmes ; incertitudes dans l'évolution des stress biotiques (maladies, ravageurs des cultures) dans un contexte de réchauffement du climat ; incertitudes dans le couplage entre les sorties des modèles climatiques et les modèles de productivité agricole; incertitudes enfin dans l'adaptation possible des différents systèmes cultureux aux changements climatiques, et de l'évolution des facteurs de production non-climatiques. Malgré le caractère crucial de la question alimentaire et du devenir de la production agricole, il reste donc difficile aujourd'hui de fournir une image plus précise de l'évolution attendue du potentiel de production agricole global dans le contexte d'un réchauffement du climat.

1.2 Impact de l'agriculture sur le climat

L'autre problématique liant changement climatique et agriculture est celle de la rétroaction sur le climat que peut potentiellement exercer la transformation, à grande échelle, d'espaces naturels en zones agricoles – ou pour des zones déjà anthropisées, des modifications importantes de gestion des surfaces (par exemple, développement de l'irrigation). En effet, l'agriculture est sans aucun doute l'activité par laquelle l'homme modifie le plus, en termes de surface, l'environnement et les paysages naturels : aujourd'hui, environ 12% des surfaces continentales (hors zones englacées) sont occupées par des cultures, et 22% par des zones de pâturage (Ramankutty et al. 2008). Ce sont donc plus du tiers des zones de végétation naturelle (forêts, prairies, savanes) qui ont ainsi été converties à l'agriculture. Sur les derniers siècles, ce sont essentiellement des zones des moyennes latitudes qui ont été converties (fig.2a). Si, comme, l'indique la fig.1, l'expansion des terres agricoles s'est au cours des dernières décennies ralentie par rapport aux siècles précédents, les différents scénarios socio-économiques pour le XXI^{ème} siècle prévoient néanmoins généralement, sous la contrainte principalement de l'augmentation de la population, un accroissement des zones agricoles, essentiellement cette fois dans les zones tropicales (fig 2.b, ici pour le scénario A2 utilisé dans

le 4^{ème} rapport du GIEC). Il existe toutefois une incertitude importante, entre scénarios et modèles socio-économiques, quant à l'importance de cet accroissement, qui dépend par exemple fortement des hypothèses sur l'accroissement futur de la productivité agricole.

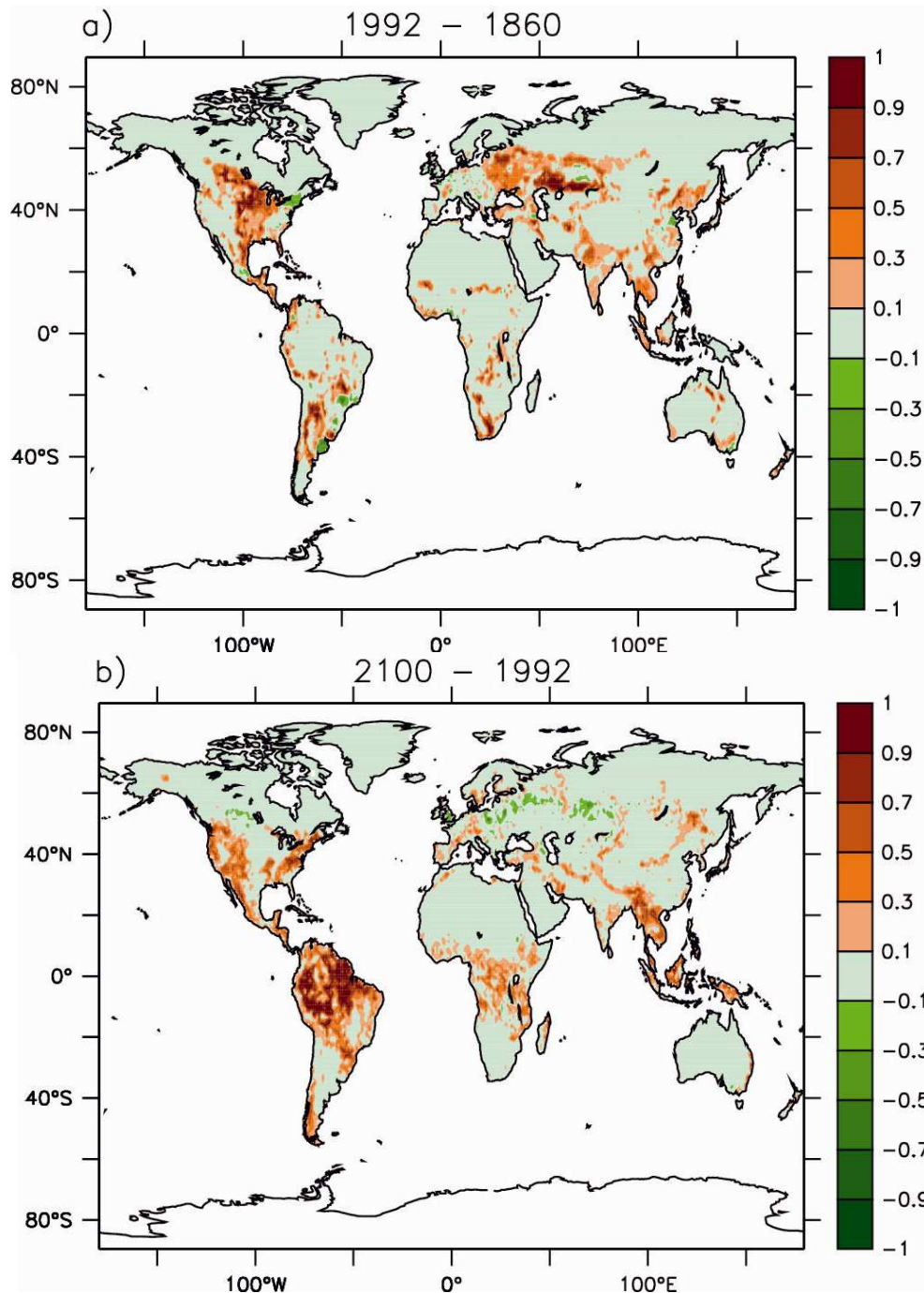


Fig.2 : Changement de la fraction anthropique par pixel (part du pixel entre 0 et 1, dévolue aux zones agricoles – prairies et cultures) a), entre 1860 et 1992, b) entre 1992 et 2100 dans le cas d'un scénario socio-économique A2. Tiré de Davin et al. (2007).

Cette importante transformation de la végétation n'est pas neutre d'un point de vue climatique. Tout d'abord, elle a des conséquences sur les grands cycles biogéochimiques (carbone, azote), et donc sur les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Ainsi,

les zones cultivées étant plus pauvres en carbone que les prairies ou forêts qu'elles remplacent (en termes de carbone présent dans les sols et dans la végétation), la conversion de zones naturelles à l'agriculture résulte en un flux net de CO₂ vers l'atmosphère, qui peut donc participer au réchauffement du climat. On estime par exemple qu'entre 12 et 26% des émissions anthropiques de CO₂ pendant la décennie 1990 proviennent de la déforestation tropicale (DeFries et Achard 2002, Houghton et al. 2003) - la majeure partie de cette déforestation s'étant effectuée à des fins agricoles (plus de 70%, selon le rapport GEO-3 de l'UNEP¹). Qui plus est, ces nouveaux agrosystèmes pouvant alors généralement stocker moins de carbone que les écosystèmes qu'ils remplacent, la capacité de la biosphère à séquestrer par la suite une partie du carbone atmosphérique d'origine anthropique (le « puits biosphérique ») s'en trouve en général diminuée. D'autre part, les cultures installées en lieu et place de la végétation naturelle peuvent être elles-mêmes des sources directes de gaz à effet de serre : ainsi, selon les différentes estimations (GIEC, 2007) les émissions de méthane issues des rizières représentent entre 12 et 23 % des émissions anthropiques de CH₄. De même l'agriculture, principalement à travers l'usage des fertilisants azotés, est responsable de plus de 40% des émissions anthropiques de N₂O (GIEC, 2007). L'agriculture contribue ainsi de façon majeure aux émissions de GES responsables du changement climatique actuel. Certains suggèrent même, en se basant sur les mesures de GES obtenues dans les carottes de glace, que les émissions de GES ont été assez significatives dès les débuts de l'agriculture (donc de la déforestation), il y a environ 6000 ans au début de l'Holocène, pour avoir empêché un refroidissement significatif du climat à cette époque dans un contexte de baisse de l'insolation (Ruddiman et al. 2003). Néanmoins cette hypothèse reste éminemment controversée (Ruddiman 2007).

En plus de ces effets biogéochimiques, la conversion d'écosystèmes naturels en zones cultivées peut également influencer le climat par des effets biogéophysiques. En effet, si pendant longtemps la végétation n'a été envisagée, en particulier dans le domaine de la biogéographie, que comme une « projection », unidirectionnelle, du climat, on sait aujourd'hui qu'elle influence physiquement, en retour, les conditions climatiques, en participant à la régulation des échanges d'énergie, radiatifs et turbulents, entre la surface et l'atmosphère. Ainsi, à travers ses propriétés radiatives, la végétation participe à déterminer l'albédo de la surface, et donc la part du rayonnement solaire incident absorbé. Par sa capacité à réguler, à travers sa transpiration, le flux d'eau vers l'atmosphère, elle contrôle la partition de l'énergie disponible en surface (le rayonnement net) en flux de chaleur latente et flux de chaleur sensible, et participe ainsi à déterminer la température de surface. Elle influence également sur la rugosité de la surface - sa capacité à s'opposer au mouvement des masses d'air en créant une force de friction. Une présentation plus détaillée de ces différents effets est proposée par exemple par Pielke et al. (2001). Le résultat en est qu'à travers ces propriétés, la végétation façonne en partie les conditions climatiques de son environnement. Remplacer à grande échelle un type de végétation (naturelle) par un autre (cultivée), présentant des propriétés biogéophysiques différentes (albédo, rugosité, efficacité d'évaporation), avec un cycle annuel différent (l'agriculteur gérant par exemple le semis et la récolte), et dans certains cas soumis à des conditions de croissance plus favorable (irrigation, fertilisation), modifie donc les interactions surface/atmosphère, et peut *in fine* résulter en des conditions climatiques différentes, au moins au niveau local. La figure 3 illustre par exemple ceci dans le cas théorique d'une déforestation.

¹ <http://www.unep.org/geo/geo3/french/178.htm>

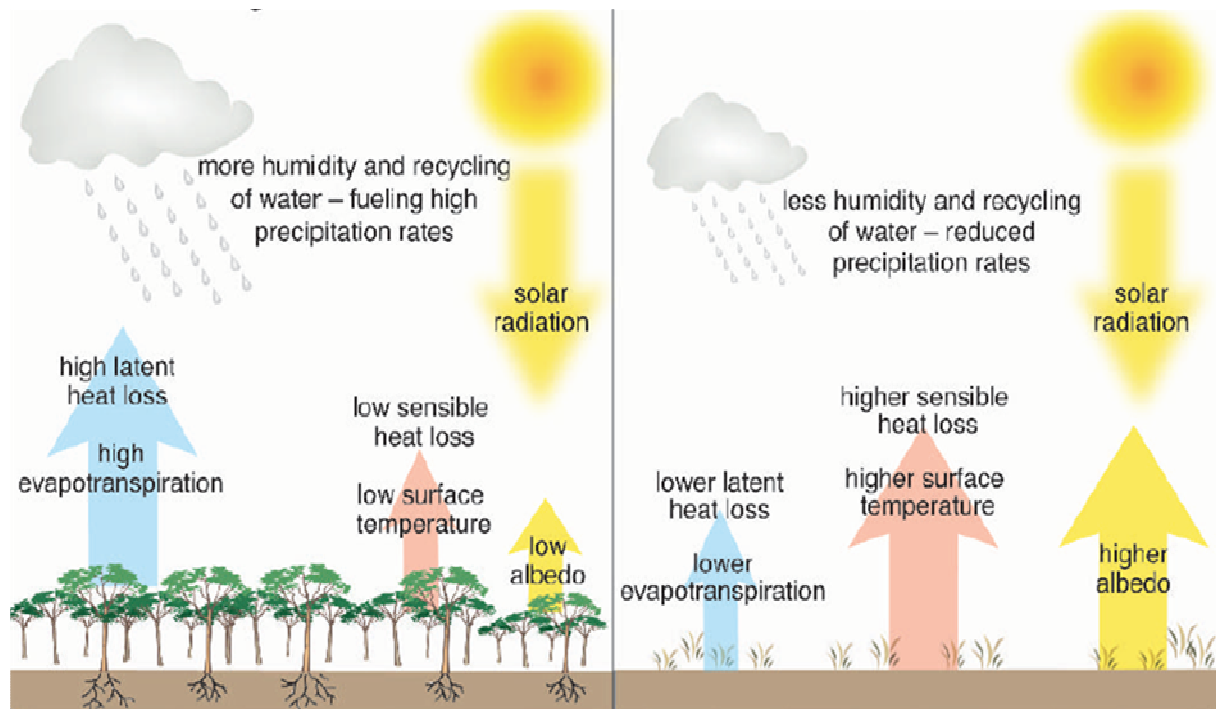


Fig.3 : effet d'une déforestation sur les échanges surface-atmosphère et les conditions climatiques locales. Tiré de Foley et al. (2003).

L'effet net sur le climat de la modification de l'usage des sols par l'homme est donc la combinaison de ces effets biogéochimiques et biogéophysiques. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées aux rétroactions biogéochimiques ont globalement un effet réchauffant sur le climat ; cependant la quantité exacte de GES émis par l'évolution de l'occupation des sols reste difficile à estimer : le GIEC indique ainsi que le changement d'occupation des sols entre l'époque préindustrielle et le présent a contribué à une augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique dans une fourchette allant 12 à 35 ppm - soit un forçage radiatif de 0.19 à 0.56 W.m^{-2} (Forster et al. 2007). L'ampleur du réchauffement associé reste donc incertaine. En ce qui concerne les effets biogéophysiques, le GIEC estime que les modifications d'albédo résultant du changement d'occupation des sols entre l'époque préindustrielle et aujourd'hui sont responsables d'un forçage radiatif négatif modeste de $-0.2 \pm 0.2 \text{ W.m}^{-2}$. Ceci correspond donc à un effet globalement refroidissant sur le climat, mais qui reste lui aussi largement incertain et surtout qui ne prend pas en compte tous les processus biogéophysiques, par exemple ceux associés aux modifications de la partition d'énergie de surface en flux turbulents. Etant donné ces incertitudes, le bilan net (biogéochimique et biogéophysique) de la modification de l'usage des sols sur le climat reste donc aujourd'hui mal connu.

2. Vers une modélisation intégrée du système climat-agriculture

Traditionnellement, ces problématiques de l'impact du climat sur l'agriculture et de la rétroaction des surfaces cultivées sur le climat ont été abordées par des communautés scientifiques différentes.

2.1 La modélisation agronomique des impacts du climat sur l'agriculture

L'impact des conditions climatiques et de leurs aléas sur les cultures a bien évidemment toujours préoccupé les agriculteurs et les agronomes. La compréhension de ces interactions entre le sol, la plante et l'atmosphère a peu à peu fait l'objet d'une nouvelle discipline scientifique : l'agrométéorologie. Dans les années 80, le développement des moyens informatiques a permis à la recherche agronomique d'intégrer les acquis de l'agrométéorologie dans des modèles de cultures, modèles informatiques mettant en équation la réponse des plantes cultivées aux conditions environnementales et météorologiques. De tels modèles permettent, pour une culture donnée, voire pour une variété particulière, de simuler, en général sur une base journalière, la croissance et le développement de la plante au cours de son cycle, et *in fine* de prédire la production au niveau des organes d'intérêt agronomiques (fruits, graines, tubercules, tiges...). En considérant les conditions environnementales et climatiques comme homogènes à l'échelle de la parcelle agricole, ceci permet donc de prédire le rendement agricole au niveau du champ. De tels modèles ont été développés en grand nombre pour différentes espèces/varieties, certains modèles génériques s'imposant et faisant l'objet de déclinaisons spécifiques pour les différentes espèces cultivées : par exemple EPIC (Williams et al., 1984), CERES, (Ritchie et Otter, 1985), WOFOST (van Diepen et al., 1989), ou encore, plus récemment, CROPGRO (Boote et al. 1998), STICS (Brisson et al. 2002), APSIM (Keating et al. 2003). Il faut noter qu'à la base, ces modèles sont fondamentalement construits pour simuler la réponse des plantes aux conditions climatiques (température, pluie, humidité, rayonnement, etc..) : ils ne prennent généralement pas en compte les facteurs non-climatiques comme les stress biotiques (pestes, maladies) et n'intègrent pas toujours les problèmes de fertilité des sols, simulant ce que l'on pourrait qualifier de « rendement potentiel atteignable sous contrainte climatique ». Néanmoins ces modèles se sont en général complexifiés au fil du temps, pour incorporer de nouveaux processus – le cycle de l'azote par exemple pour mieux prendre en compte la nutrition azotée. Bien que pouvant être considérés comme des modélisations mécanistes du fonctionnement des plantes, de tels modèles reposent cependant toujours sur une certaine dose d'empirisme et un certain nombre de paramétrisations, qui nécessitent d'être établies et calibrées d'après des mesures en champ pour telle ou telle plante, ou variété. La figure 4 résume de façon simplifiée le concept général d'un modèle de culture.

Parallèlement, s'est développée au sein de la communauté des sciences du climat la modélisation du système climatique. Les modèles de climat (General Circulation Models, GCMs) constituent une mise en équation de la dynamique atmosphérique et océanique, des processus d'interface mer-glace et atmosphère-surface. Ces modèles résolvent les équations de la mécanique des fluides dans un nombre discret d'instantanés dans le temps et de points dans l'espace, en substituant le continuum spatial par une grille de points. Ces modèles permettent ainsi la prévision du temps aux échelles saisonnières et climatiques. L'intérêt offert par ce type de prévision, couplée à la modélisation agronomique, apparaît alors de façon assez immédiate : cela pourrait permettre, sinon de prédire, du moins d'apporter une information *a priori*, à l'échelle saisonnière, d'une part, sur les rendements qui peuvent être attendus une année donnée en une région donnée, et à l'échelle pluri-décennale, d'autre part, sur les impacts possibles du changement climatique sur la productivité agricole. De fait, chercher à relier prévisions météorologiques saisonnières et modèles de cultures, pour ainsi aboutir à des prévisions saisonnières agricoles, constitue un axe de recherche actuel important, à l'interface entre sciences agronomiques et sciences du climat (pour une revue, voir par exemple Hansen et al. 2006). De même, à l'heure où le changement climatique devient une perspective de plus en plus concrète et où l'étude de ses futurs impacts devient de plus en plus nécessaire, combiner modèles agronomiques et simulations climatiques pour étudier l'effet du réchauffement climatique sur les rendements agricoles dans différentes régions fait l'objet de

multiples études : trop nombreuses pour être citées ici, des références pourront être trouvées dans des revues récentes sur le sujet comme celles de Challinor et al. (2009), Gornall et al. (2010), ou encore Roudier et al. (*in rev.*) (qui figure en annexe à la fin de ce manuscrit).

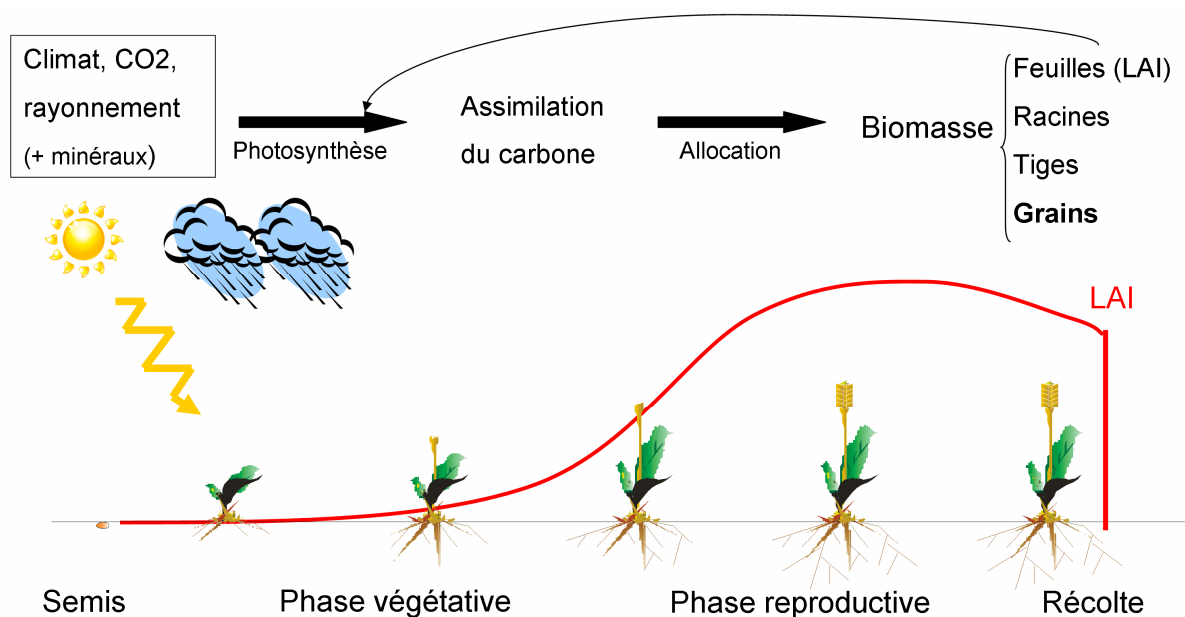


Fig.4 : Schéma conceptuel d'un modèle de culture, à l'échelle de la parcelle. LAI : Indice Foliaire (Leaf Area Index).

Néanmoins, comme il a été dit plus haut (sec.1), combiner de la sorte modèle de climat et modèle agronomique présente de nombreuses difficultés, et l'information ainsi apportée en termes de rendements, à l'échelle saisonnière comme à l'échelle climatique, reste tributaire de nombreuses incertitudes. Parmi ces difficultés, un point important est que combiner modèles de climat et modèles de culture pose davantage de problèmes qu'un simple couplage entre ces deux types de modèles – en particulier lorsqu'on souhaite obtenir une information sur l'évolution des rendements à grande échelle, c'est-à-dire à l'échelle régionale par exemple², qui sera en général l'échelle d'intérêt pour les acteurs et décideurs à qui l'on délivre une information sur les impacts sociétaux.

En effet, parce qu'ils ont été développés dans des buts différents avec des contraintes différentes, modèles climatiques et modèles agronomiques travaillent à des échelles de temps et d'espace différentes : les modèles agronomiques sont en général spécifiques d'une espèce (voire d'une variété), et sont censés s'appliquer à l'échelle de la parcelle agricole, où les conditions pédo-climatiques (voire les pratiques culturales telles que irrigation ou fertilisation, si elles sont prises en compte) qui servent d'entrée au modèle peuvent être considérées comme homogènes. Ces modèles n'ont pas été conçus pour des applications directement à grande échelle. Les modèles de climat, en revanche, fournissent des résultats climatiques à l'échelle d'une maille d'une centaine de kilomètres de côté au minimum. Ces variables climatiques simulées doivent être considérées comme des moyennes calculées sur cette maille. De telles sorties ne peuvent *a priori* pas être utilisées telles quelles en entrée d'un modèle de culture : la représentation des processus impliquant la plante, le sol et l'atmosphère – en particulier les

² Dans cette thèse, on appellera grande échelle, d'un point de vue agronomique, toute échelle supérieure à la parcelle agricole – typiquement, l'échelle d'un pays (ou d'une sous-partie si le pays est vaste), voire l'échelle « régionale » : plusieurs pays agrégés (exemple : l'Afrique de l'ouest). Il ne s'agit donc pas de la « grande échelle » telle qu'utilisée couramment en climatologie (i.e., l'échelle continentale ou supérieure).

processus hydrologiques - est a priori dépendante de l'échelle considérée, et les modèles de cultures étant conçus, calibrés et validés à l'échelle de la parcelle agricole, ils nécessitent des entrées « climatiques » à cette échelle. Même en admettant qu'un GCM simule parfaitement la moyenne climatique sur une maille, forcer avec de telles variables un modèle agronomique, qui fonctionne habituellement à l'échelle de la parcelle, ne permettra a priori pas de simuler le rendement agricole moyen sur cette maille : les modèles de cultures sont non linéaires, et la simulation de la moyenne n'équivaudra pas à la moyenne des simulations. De nombreuses études ont illustré ce biais, par exemple Baron et al. (2005) sur l'Afrique de l'Ouest avec le modèle agronomique SARRAH. Autrement dit, comme beaucoup de modèles environnementaux ou de modèles d'impacts, les modèles de cultures sont spécifiques d'une échelle donnée – ici l'échelle parcellaire- et nécessite des données d'entrée à cette échelle (Heuvelink, 1998).

Ceci explique en partie pourquoi la communauté agronomique, en général, ne s'autorise pas à utiliser directement des modèles de culture à grande échelle. Pour relier GCMs et modèles de cultures, l'approche la plus usuelle est alors d'essayer de retrouver une information locale, utilisable par les modèles agronomiques, à partir de l'information fournie au niveau d'une maille par les GCMs. Cette désagrégation spatiale, ou « downscaling », consiste à combiner l'information du climat à grande échelle avec des spécificités régionales ou locales (typiquement la topographie, la répartition des terres/océans, l'utilisation du sol, etc. ...) pour retrouver le climat local. Pour ce faire il existe différentes méthodes : dynamiques, en utilisant, imbriqués dans les sorties de GCM, des modèles régionaux simulant le climat local d'une région déterminée à haute résolution (20-50 km); statistiques, en utilisant des relations empiriques entre la circulation atmosphérique à grande échelle et le climat local; ou encore des méthodes combinant les deux approches (pour une revue, voir par exemple Zorita et Von Storch 1999). Le principe consiste alors, à l'aide d'une de ces méthodes calibrées pour la région d'étude, à retrouver à partir de la séquence climatique fournie par le GCM un certain nombre de séquences locales fictives, pouvant ensuite servir à forcer un modèle de culture: on obtient ainsi des rendements sur des parcelles fictives au sein de la maille, rendements dont la distribution est similaire à celle des rendements qui seraient réellement observés, idéalement, sur cette maille.

Dans une optique d'étude d'impact à grande échelle, l'analyse des impacts de la variabilité climatique ou du changement climatique sur les cultures ne peut néanmoins s'arrêter à cette échelle: il est ensuite nécessaire de réagréger les sorties à une échelle supérieure à la parcelle (« upscaling ») - par exemple l'échelle régionale. En toute rigueur, cet « upscaling » nécessite alors de prendre en compte l'hétérogénéité, à grande échelle, des paramètres d'entrée du modèle : en effet parmi ceux-ci, types de sols, variétés cultivées, dates/densités de semis, itinéraires techniques.... peuvent à l'évidence varier fortement au sein d'une même région. Pour rendre compte de cette hétérogénéité, certains auteurs proposent une agrégation des paramètres en amont du modèle (Haskett et al. 1995), ou une agrégation, en aval, de simulations obtenues avec différents paramètres (Jagtap et Jones 2002). D'autres proposent de recalibrer empiriquement le modèle agronomique par rapport à des sorties à grandes échelles pour que ses sorties soient applicables à cette échelle (Chipanshi et al. 1999). La diversité des approches est importante, et Hansen et Jones (2000) fournissent une revue des problèmes inhérents à ces différentes méthodes d'« upscaling ».

On peut donc constater que selon cette approche classique, combiner GCMs et modèles de cultures pour étudier les impacts à grande échelle du climat sur les rendements agricoles implique le plus souvent des « transferts d'échelle » entre types de modèles, à la fois descendants et ascendants. De tels transferts d'échelle sont à l'évidence complexes, générateurs d'incertitudes, et requièrent de coûteux (en temps) transferts de données entre des plateformes de modélisation différentes. La plupart des études d'impact agronomique restent

donc en général à l'échelle locale, utilisant typiquement des projections de GCMs « downscalées » pour effectuer des simulations sur un échantillon de sites dans la zone d'étude considérée - les résultats sur ces sites étant considérés représentatifs de la zone d'étude. Comparer ces différentes études, agréger les résultats et dégager une estimation d'impact à plus grande échelle nécessite alors un processus de méta-analyse de ces différentes études - voir par exemple Roudier et al. (*in rev.*). Un enjeu majeur de l'étude des impacts du changement climatique sur l'agriculture reste donc de fournir des projections à grande échelle cohérentes et spatialement explicites. Les études d'impact reposant sur des modèles agronomiques et recouvrant explicitement tout un domaine régional ou continental restent encore rares (par exemple, Jones et Thornton 2003, sur l'Afrique et l'Amérique du Sud). Pour réaliser des projections à grande échelle, un certain nombre d'auteurs préfèrent alors utiliser des relations statistiques directes entre variables climatiques annuelles et rendements agricoles. De telles relations empiriques peuvent en effet être directement établies à grande échelle, par exemple en utilisant des variables climatiques saisonnières moyennées à l'échelle d'un pays et les données agricoles nationales de la FAO (Food and Agriculture Organization). Elles peuvent ensuite être extrapolées à des scénarios de changement climatique pour prévoir l'évolution des rendements (Lobell et al. 2008, Schlenker et Lobell 2010). Néanmoins, s'ils présentent l'avantage d'être plus rapidement et facilement utilisables, de tels modèles statistiques nécessitent de longues séries de données de bonnes qualité (climatiques et, surtout, agronomiques) pour être établis - ce qui, pour certaines régions, constitue un obstacle majeur - et, comme toute relation statistique, leur utilisation en dehors du domaine de calibration « climatique » reste nécessairement sujette à caution. Par ailleurs, certains facteurs qu'on peut supposer pertinents pour la prévision de la productivité végétale, comme la variabilité climatique intra-saisonnière ou l'effet fertilisant de l'augmentation du CO₂ atmosphérique, ne sont pas bien pris en compte par ce type d'approche.

A la lumière de cette brève revue méthodologique, on constate donc que si la communauté agronomique a depuis longtemps mis en place des outils et méthodes pour tenter de prévoir les impacts du climat sur la productivité agricole, il n'en subsiste pas moins clairement le besoin d'une modélisation à grande échelle de l'impact de l'évolution du climat sur les rendements, qui fonctionnerait davantage à l'interface des modèles de climat tout en conservant les fondements mécanistes de la modélisation agronomique. Ce besoin d'une modélisation agronomique davantage orientée vers les applications climatiques à grande échelle conduit à présent certains auteurs à vouloir développer une approche en quelque sorte intermédiaire, la « modélisation agronomique à grande échelle » (*large-area crop modelling*, Challinor et al. 2004, Iizumi et al. 2009). Une telle approche cherche à combiner les avantages d'une approche empirique (faible nombre de paramètres, validité à grande échelle et non spécifique d'un site) et celle d'une approche mécaniste (basée sur les processus, donc pouvant être appliquée dans des conditions environnementales et climatiques différentes) – mais elle compte à l'heure actuelle encore peu d'exemples.

L'agrométéorologie et la modélisation agronomique, fondamentalement, s'intéressent à la prévision de l'impact des conditions climatiques sur le fonctionnement des plantes : les problématiques liées aux rétroactions que peut exercer cette végétation sur les conditions atmosphériques, à travers par exemple, comme on l'a dit plus haut, la régulation des flux de chaleur sensible et latente, n'y sont *a priori* pas abordées en tant que telles. En revanche, la compréhension de ces interactions surface/atmosphère et de leur effet sur le climat à grande échelle constitue depuis longtemps un des axes de recherche majeurs de la communauté des sciences du climat.

2.2 La prise en compte des surfaces continentales dans les modèles de climat

Il a été brièvement décrit plus haut comment la végétation pouvait, par des processus biogeophysiques, influencer les conditions atmosphériques locales, et donc comment l'action de l'homme sur la répartition à grande échelle de cette végétation pouvait indirectement modifier le climat. De tels processus doivent donc être représentés dans les modèles atmosphériques utilisés pour simuler le climat et son évolution. Depuis l'origine des modèles de climat à aujourd'hui, Sellers et al. (1997) distinguent trois générations dans l'évolution des modèles représentant les surfaces continentales et leurs interactions avec l'atmosphère.

Les premiers modèles atmosphériques, à la fin des années 60, utilisaient des représentations très frustes de la surface et ne représentaient pas explicitement la végétation : l'albédo et la rugosité de surface étaient prescrits pour chaque point de la grille de surface, et l'évaporation calculée comme une simple fonction de l'eau du sol, elle-même contenue dans un seul réservoir – d'où le qualificatif de « bucket model » pour ce type de modèle (Manabe 1969, Budyko 1974).

Les premières paramétrisations prenant explicitement en compte le rôle de la végétation sont apparues à la fin des années 1970, avec une deuxième génération de modèles de surface (modèle BATS, Dickinson 1984, modèle SiB, Sellers et al. 1986, modèle SECHIBA développé à l'IPSL, Ducoudré et al. 1993). Ces modèles biophysiques représentent le contrôle qu'exerce la végétation sur l'absorption du rayonnement, la turbulence dans la couche limite et le transfert d'eau vers l'atmosphère. Ce dernier point en particulier est formalisé par l'intermédiaire d'une conductance stomatique, qui rend compte de l'ouverture des stomates des plantes et donc du contrôle que celles-ci exercent sur l'évapotranspiration. Cette conductance est le plus souvent paramétrée empiriquement en fonction des conditions climatiques - température, humidité, rayonnement (Sellers et al. 1997) – ce qui permet donc de fait de rendre compte des interactions entre végétation et climat. Le cycle saisonnier de la végétation est en général prescrit mensuellement pour représenter les variations saisonnières.

Une troisième génération de modèle de surface (e.g., Bonan et al. 1995) voit le jour avec une formulation plus mécaniste de la conductance stomatique, visant à rendre compte du couplage entre transpiration foliaire et photosynthèse. En effet, l'ouverture des stomates permet à la fois aux plantes de transpirer, et donc de mettre en mouvement un flux de sève primaire depuis le sol et leurs racines, et au CO₂ de pénétrer dans les tissus foliaires, où a lieu la photosynthèse. Ces nouveaux modèles de surface incluent donc un calcul de l'assimilation du carbone, basé par exemple sur les travaux de Farquhar et al. (1980), permettant de rendre compte de façon mécaniste de l'équilibre entre assimilation de CO₂ et transpiration qui caractérise le fonctionnement des plantes. Des développements supplémentaires permettent alors peu à peu d'aboutir à une modélisation explicite de la végétation dans son ensemble, de son fonctionnement et de son cycle saisonnier : des schémas fonctionnels d'allocation permettent de répartir les assimilats dans les différents compartiments de la biomasse (feuilles, tiges, racines...) (e.g., Friedlingstein et al. 1999) et du sol (e.g., Parton et al. 1988), des schémas de phénologie permettent de décrire le cycle de la végétation (apparition, croissance, sénescence) en fonction des conditions climatiques (e.g., Botta et al. 2000). Au final, la végétation est ainsi calculée de façon complètement interactive avec le climat : elle répond au climat, et le climat, à travers les interactions surface/atmosphère, est influencé en retour par la végétation.

Dans ces modèles de surface, que l'on peut aussi qualifier de modèles de végétation globaux, la diversité de la végétation est en général représentée par quelques grands Types Fonctionnels de Plante (PFTs, Plant Functional Types) : herbacées, ligneux sempervirents, ligneux caduques, etc... Ces PFTs peuvent en général coexister sur les différents points de grille, la répartition spatiale de ces types de végétation à l'échelle globale étant prescrite dans

le modèle d'après des cartes de végétation. Cependant, l'introduction dans ces modèles de végétation de modules biogéographiques permet désormais aussi de simuler la dynamique globale des écosystèmes (Foley et al. 1998, Cox et al. 1999, Krinner et al. 2005): de tels modèles rendent compte explicitement des processus de mortalité et de compétition entre espèces, et donc permettent de calculer la distribution globale de la végétation et son évolution (le déplacement de tel ou tel type de végétation) en réponse aux variations climatiques. On aboutit ainsi à la notion de modèle global de végétation dynamique (Dynamic Global Vegetation Model - DGVM), ou encore de modèle de biosphère. La figure 5 résume de façon très simplifiée la place et le fonctionnement général d'un DGVM dans un modèle de climat global (ici le DGVM ORCHIDEE développé à l'IPSL). Ces modèles permettent de simuler de façon couplée, à grande échelle, le système végétation/climat : l'impact du climat sur le fonctionnement de la végétation et sa distribution spatiale, et la rétroaction sur le climat qui découle de ce fonctionnement et de cette distribution – à travers les processus biogeophysiques et les processus biogéochimiques (tels que les émissions ou l'absorption de CO_2).

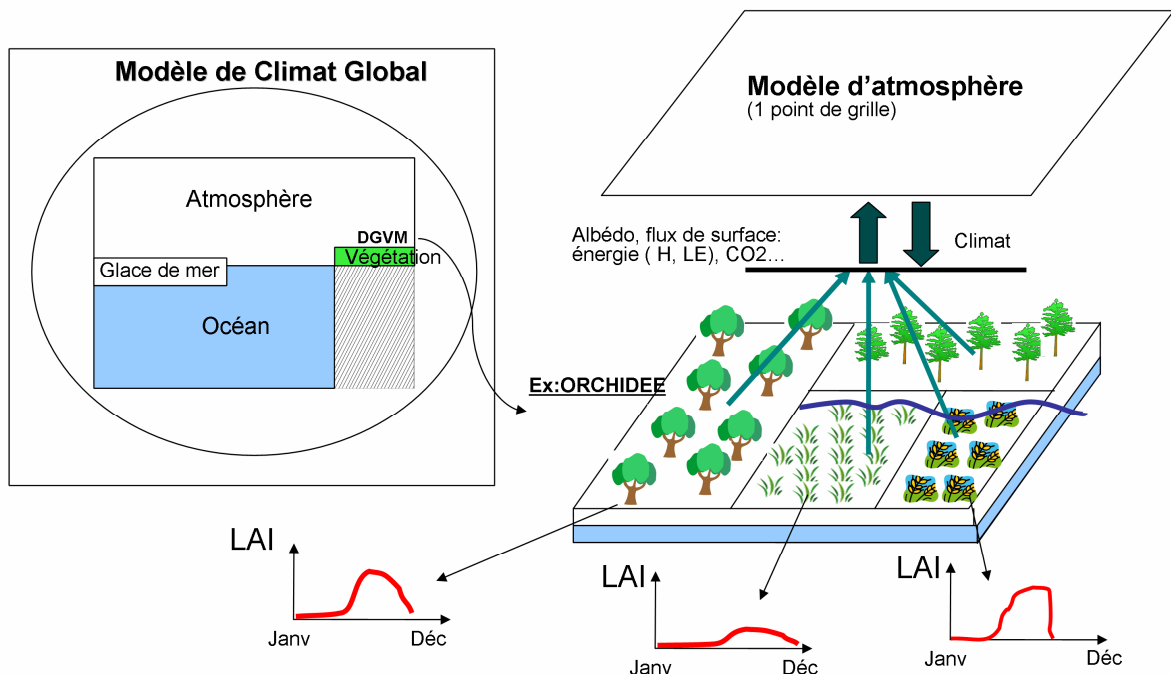


Fig.5 : schéma simplifié de la place d'un DGVM comme ORCHIDEE (IPSL) au sein d'un modèle de climat global. Le modèle interagit principalement avec l'atmosphère, mais est aussi relié à l'océan qui reçoit les flux d'eau douce du ruissellement simulé sur les continents. Sur un point de grille d'ORCHIDEE, dont la dimension correspond à celle du point de grille du modèle d'atmosphère, différents types de végétation coexistent (en général prescrits d'après une carte de végétation, mais pouvant aussi être calculés par le modèle selon le climat) : chacun « voit » le même climat, et l'évolution des différents types de végétation (représentés ici par le cycle d'Indice Foliaire (Leaf Area Index, LAI) est calculée séparément, à l'échelle journalière. Les flux surface/atmosphère (flux de chaleur latente LE, de chaleur sensible H, flux de CO_2), et les variations d'albédo sont calculés pour chaque type de végétation, et agrégés au niveau de la maille pour être renvoyés vers le modèle d'atmosphère. Contrairement à ce que ce schéma pourrait laisser croire, il n'y a pas de distribution géographique explicite des différents types de végétation au sein de la maille – seulement une distribution quantitative.

On peut noter que ce dernier point – la rétroaction climatique – ne constitue plus nécessairement le seul objectif de tels modèles : les DGVMs ont un intérêt propre à être utilisés en mode non-couplé, c'est-à-dire forcés en entrée par des données climatiques, ou des projections issues d'autres GCMs, ne prenant pas en compte, en retour, les flux

surface/atmosphère calculés par le DGVM. Ceci permet notamment d'utiliser différentes projections de modèles de climat pour forcer le modèle de végétation, afin par exemple d'étudier les impacts du changement climatique sur la productivité végétale globale, la répartition des écosystèmes ou les stocks de carbone qu'ils contiennent (Cramer et al. 2001, Scholze et al. 2006, Sitch et al. 2008).

Au-delà de la modélisation des interactions végétation/atmosphère, ces développements s'inscrivent à l'évidence dans une tendance de la modélisation climatique à évoluer vers une modélisation plus complète du Système Terre (les ESMs, ou « Earth System Models »): dans cette nouvelle conception, la description du système climatique, en plus des composantes physiques « classiques » du climat que sont l'atmosphère et l'océan, inclut aussi les glaces, la biosphère et la chimie atmosphérique; la modélisation vise alors à représenter les différentes composantes du système de façon la plus interactive possible, en transformant en variables du système et couplant entre elles des quantités qui en constituaient auparavant des conditions aux limites. La modélisation explicite de la biosphère continentale et de ses échanges de carbone avec l'atmosphère permet ainsi, par exemple, de coupler simulations du climat et simulation du cycle du carbone (Friedlingstein et al. 2006), voire même, pour les plus récents, d'intégrer le cycle de l'azote (Thornton et al. 2007).

Depuis les débuts de la modélisation climatique, les modèles de climat ont été utilisés pour étudier l'influence des conditions de surface et de leur modification par l'homme sur le climat. Faute d'une modélisation couplée avec le cycle du carbone, qui n'a pu être obtenue que récemment dans les modèles les plus avancés, la grande majorité de ces études, historiquement, se sont restreintes aux effets biogéophysiques de l'usage des sols (albédo, rugosité, évaporation). Nombre de ces études ont consisté en des expériences idéalisées de déforestation, totale ou partielle (de Dickinson et Henderson-Sellers 1988, à Bala et al. 2007): elles dépeignent principalement une déforestation ayant un effet biogéophysique refroidissant aux hautes/moyennes latitudes, à travers un effet principalement radiatif (augmentation de l'albédo), et un effet réchauffant aux latitudes tropicales via un effet principalement hydrologique (réduction de l'évapotranspiration) (Bonan et al. 2008).

Au-delà de cet effet théorique, un certain nombre d'études, à l'aide de GCMs ou de modèles de climat de complexité intermédiaire, ont cherché à établir l'impact biogéophysique sur le climat de la modification réelle, historique (depuis l'époque pré-industrielle) de l'usage des sols, telle que représentée sur la fig.2. (Brovkin et al. 1999, Betts et al. 2001, Govindasamy et al. 2001, Bounoua et al. 2002, Feddema et al. 2005a, Brovkin et al. 2006, Davin et al. 2007, Findell et al. 2007). Cette expansion des zones agricoles ayant principalement eu lieu aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (cf fig.2), elle a essentiellement eu un effet physique refroidissant sur le climat, en augmentant l'albédo de surface. Dans la plupart des études ce refroidissement reste essentiellement localisé sur les régions où la perturbation est appliquée, pouvant localement atteindre des valeurs importantes (de l'ordre du degré), mais avec un faible impact sur la température globale (par exemple -0.05K dans Davin et al. 2007). Les études sur l'effet climatique de la modification de l'usage des sols dans le futur, utilisant des projections socio-économiques de l'occupation des sols pour le 21^{ème} siècle telles que celles des scénarios SRES, sont un peu moins nombreuses (DeFries et al. 2002, Feddema et al. 2005b, Sitch et al. 2005, Voldoire et al. 2006). Selon Davin (2008) ces études ne font pas véritablement ressortir de conclusions robustes quant à l'impact futur sur le climat. Davin et al. (2007) reportent, dans leur propre étude, un refroidissement global de -0.14K en 2100 sous un scénario A2 (cf fig.2), avec toutefois des signaux régionaux très contrastés, et notamment un réchauffement important (>1K) dans les régions tropicales largement déforestées (Amazonie).

Il faut noter ici qu'au-delà du calcul de forçage radiatif mentionné dans la section 1.2, ces effets biogéophysiques ne sont pas pris en compte dans les simulations climatiques du dernier rapport du GIEC. En effet seuls 3 des 23 modèles ayant participé à cet exercice ont pu prendre compte dans leurs simulations le changement d'occupation des sols (GISS-EH, GISS-ER et UKMO-HadGEM1): autrement dit, ces simulations sont forcées par des concentrations de gaz à effet de serre incluant les effets biogéochimiques d'une modification de l'usage des sols (par exemple, les émissions de CO₂ dues à la déforestation future), mais ne tiennent pas compte de cette modification des conditions de surface dans leur simulation (la couverture végétale reste fixe). Etant donné les effets climatiques régionaux importants de l'évolution de l'usage des sols mis en évidence par les différentes études citées ci-dessus, améliorer le réalisme des projections climatiques, et singulièrement de leurs déclinaisons régionales, nécessite donc de mieux prendre en compte dans les simulations l'évolution des conditions de surface. Le prochain exercice de modélisation réalisé à la demande du GIEC, pour son 5^{ème} rapport, devrait tenir compte de cette nécessité, et prendre en compte explicitement l'évolution de l'usage des sols.

2.3 Intégrer les agrosystèmes dans les modèles de biosphère

Malgré la diversité des modèles et des configurations expérimentales utilisées, toutes les études citées dans la section précédente reposent sur une approximation commune dans la représentation de l'évolution de l'usage des sols : la végétation agricole, qui remplace les forêts ou les prairies dans ces expériences, est approximée par des herbacées naturelles. Les zones cultivées ne sont pas représentées en tant que telles : les herbacées « pseudo-agricoles » ne diffèrent pas, ou très peu, des herbacées naturelles dans les modèles, et ne prennent pas en compte les spécificités des écosystèmes gérés par l'homme.

Or la végétation cultivée diffère, à l'évidence, de la végétation naturelle - bien entendu de la végétation ligneuse, mais aussi de la végétation herbacée -, que ce soit en termes de phénologie, avec un cycle saisonnier géré par l'agriculteur (semis, récolte), en termes de productivité, avec des variétés sélectionnées pour être plus productives et souvent fertilisées, ou en termes de conditions environnementales, avec éventuellement de l'irrigation. Cette gestion par l'homme modifie le fonctionnement de la végétation, et donc les processus biogéophysiques et biogéochimiques de surface : cela peut alors avoir un effet sur le climat. McPherson et al. (2004) ont ainsi comparé les températures sur des zones cultivées en blé d'hiver et des zones avoisinantes occupées en herbacées naturelles en Oklahoma entre 1994 et 2001. Ils reportent des anomalies de température importantes (de l'ordre du degré, en termes de température maximale journalière essentiellement) sur les zones cultivées : anomalies froides entre novembre et avril, anomalie chaude de juin à août. Ils attribuent ces anomalies à la phénologie particulière du blé d'hiver, pratiquement « inversée » par rapport à celle des herbacées naturelles avoisinantes: semis à l'automne, croissance puis dormance pendant l'hiver, puis croissance très rapide et récolte précoce au printemps ou au début de l'été suivant. La phénologie différente des plantes cultivées peut donc, dans certains cas, rétroagir de façon significative sur les conditions atmosphériques. De nombreuses études, basées sur des observations (Fowler and Helvey 1974, Barnston and Schickedanz 1984, Mahmood et al. 2004, 2006, Bonfils et Lobell 2007, Lobell et Bonfils 2008) ou sur des études de modélisation régionale incluant une représentation de l'irrigation (Chase et al. 1999, Adegoke et al. 2003, Snyder et al. 2006) ont également mis en évidence l'effet refroidissant de l'irrigation sur le climat local ou régional : en journée, une évaporation accrue entraîne une diminution de la température de surface. Bien que cet effet soit faible voire nul à l'échelle du globe (Boucher et al. 2004, Sacks et al. 2008) - les zones irriguées concernant environ 18% des zones cultivées, soit 2% des surfaces continentales - régionalement le refroidissement

peut être important, de l'ordre du degré. Certains auteurs reportent également un effet positif de l'irrigation sur les températures nocturnes dans certaines régions, par limitation du refroidissement radiatif pendant la nuit (Christy et al. 2006). En termes de précipitation, certaines études récentes suggèrent un impact significatif, à l'échelle régionale, de l'expansion des zones irriguées sur les quantités et la distribution spatiale des pluies, en particulier dans les zones soumises à des régimes de mousson comme le sous-continent indien (Lee et al. 2009, Douglas et al. 2009). Au-delà de l'effet du changement de végétation lui-même (de naturelle à cultivée), la gestion de ces cultures par l'homme, dans un second temps, peut donc significativement affecter le climat elle aussi. Enfin, par des études de modélisation régionale différenciant explicitement au sein du modèle de surface les paramètres pour les herbacées naturelles et les cultures, Costa et al. (2007) et Sampaio et al. (2007) montrent qu'en Amazonie, la déforestation n'a pas le même effet sur le climat selon que la forêt est convertie en cultures ou en prairies : Sampaio et al. (2007) indiquent ainsi que la déforestation extrême (à 80%) de l'Amazonie entraîne une baisse des précipitations et une hausse des températures de -15% et +2.8°C pour une conversion en prairies, et -19% et +3.7°C pour une conversion en cultures. Costa et al. (2007) rapportent des résultats similaires : -3.9% et -15.7% de précipitation pour une déforestation à 75% avec conversion en prairies ou cultures, respectivement.

Ces quelques exemples indiquent que, fondamentalement, une approximation par les herbacées naturelles n'est pas suffisante pour représenter avec précision les rétroactions surface-atmosphère au niveau des zones cultivées. On ne peut calculer avec précision l'impact climatique de l'expansion des zones cultivées au détriment de la végétation naturelle en approximant ces zones cultivées par, justement, de la végétation naturelle. Quand l'expansion des zones agricoles se fait au détriment des forêts, l'impact climatique d'une déforestation n'est *a priori* pas le même selon qu'on remplace la forêt par des herbacées ou des cultures ; et dans le cas où ces zones agricoles remplacent des zones de prairies, on ne peut correctement estimer l'impact sur le climat en remplaçant dans le modèle des herbacées naturelles par d'autres herbacées naturelles.

La communauté scientifique travaillant au développement des DGVM est consciente depuis le début des limites de cette approximation, et différentes équipes ont peu à peu cherché à mieux représenter les zones cultivées dans les modèles de biosphère. L'approche qui semble la plus directe et naturelle pour cela est alors de vouloir tirer partie des acquis et de l'expérience de la modélisation agronomique : utiliser et adapter les outils existants – les modèles de culture – au sein des modèles de biosphère. Une telle approche méthodologique ouvre alors une double perspective : cela peut permettre non seulement d'améliorer la représentation des zones cultivées dans les DGVMs et de calculer de façon plus réaliste les rétroactions climatiques associées, mais cela offre également, dans le même cadre de modélisation, un outil possible pour simuler les impacts du climat sur les rendements agricoles à grande échelle. Autrement dit, cette approche permet d'intégrer et de faire converger vers un seul et même outil de modélisation les objectifs scientifiques des communautés agronomiques et climatiques soulignés dans les section 2.1 et 2.2 : simuler de façon intégrée et cohérente, les impacts du climat sur l'agriculture à grande échelle d'une part, et la rétroaction climatique des zones cultivées, d'autre part (Betts et al. 2005). Ceci a ainsi amené à un certain rapprochement des deux communautés sur ce sujet, et à l'heure actuelle, plusieurs groupes de modélisation ont inclus ou incluent une représentation des zones cultivées dans leur modèle de biosphère : Kucharik et Brye (2003) ont inclus des modules spécifiques des cultures, issus du modèle EPIC, dans le modèle de biosphère IBIS (Foley et al. 1996); Osborne et al. (2007) ont inclus le modèle de cultures GLAM dans le schéma de surface (MOSES) du modèle de climat du Met Office ; Bondeau et al. (2007) ont inclus plusieurs PFTs cultureux dans le modèle de biosphère Lund–Potsdam–Jena LPJ (Sitch et al.

2003), s'inspirant pour cela des modèles SWAT (Arnold 1994) et SWIM (Krysanova et al. 2005) ; Lokupitiya et al. (2009) ont inclus une représentation spécifique de la phénologie des cultures dans le Simple Biosphere Model SiB (Sellers et al. 1996) ; enfin, Gervois et al. (2004), puis Smith et al. (2010a), ont associé le modèle de biosphère développé à l'IPSL, ORCHIDEE (Krinner et al. 2005), avec le modèle de culture STICS (Brisson et al. 2002) développé par l'INRA. Des travaux sont également en cours au NCAR pour introduire une représentation des cultures au sein du Community Land Model CLM (Levis et al. 2008), de même qu'au Met Office, au sein du nouveau schéma de surface JULES (van den Hoof et al. 2008). On peut alors parler, pour caractériser l'ensemble de ces modèles, d'agro-DGVMs (Arneth et al. 2010).

Toutefois, cette approche transdisciplinaire doit surmonter une différence de conception et d'échelle entre la modélisation agronomique et la modélisation de la végétation au sein des modèles de biosphère. Comme il a été dit plus haut, les modèles de culture s'appliquent fondamentalement à petite échelle, telle que celle de la parcelle, et la communauté agronomique reste très prudente quant à leur application directe à plus grande échelle ; d'autre part, ils sont souvent spécifiques d'une culture, et pour cela fortement paramétrés. La modélisation de la biosphère, elle, comme on l'a vu, s'effectue directement en lien avec les modèles de climat : le fonctionnement des plantes y est donc simulé à l'échelle de la maille de GCM, avec une description de la végétation se voulant davantage fonctionnelle et générique. Bien que les DGVMs soient essentiellement validés par des comparaisons avec des mesures sur site - donc, fondamentalement, à petite échelle (des données de validation à plus grande échelle, en termes par exemple d'indice foliaire, d'évaporation ou de flux de CO₂, étant délicates à obtenir, même par satellite) - l'hypothèse est faite, assez implicitement, que ces modèles peuvent s'appliquer à grande échelle, forcés par des sorties de modèles de climat, pour simuler *in fine* une végétation moyenne, à l'échelle d'une maille de modèle (quelques centaines de km). Les DGVMs sont, de fait, couramment utilisés à des résolutions typiques de celles des modèles de climat. Ce saut d'échelle, bien que peut-être contestable sur le plan théorique, est néanmoins assez inévitable pour pouvoir avoir une approche globale de la modélisation de la biosphère. Dans une des rares études abordant cette problématique, Müller et Lucht (2007), en forçant le modèle LPJ avec des données climatiques agrégées à différentes échelles, de 0.5x0.5° à 10x10°, montrent qu'à l'échelle globale, les résultats obtenus (en termes par exemple de flux de carbone ou d'eau) sont peu sensibles à la résolution du modèle - avec par exemple des déviations par rapport à la simulation de référence à 0.5° inférieures à 5%, pour une résolution à 4 ou 5°. La plupart de ces différences apparaissent, comme attendu, dans les régions à fort gradient climatique et écologique. Ils indiquent également que la résolution n'a que très peu d'impact sur la variabilité temporelle des résultats du modèle. Ceci suggère qu'à l'échelle globale, les DGVMs peuvent être utilisés à des résolutions correspondant à celles des GCMs sans trop de perte d'information.

L'enjeu, dans le rapprochement des modèles agronomiques et des DGVMs, consiste donc à extraire l'information fonctionnelle essentielle, suffisante, des modèles de culture, pour la transposer au sein du modèle de biosphère. D'une façon générale, les stratégies employées pour cela dans les différentes études citées ci-dessus ont en commun de vouloir conserver autant que possible inchangés, en « amont », les formalismes des processus fondamentaux du modèle de biosphère, tels que l'hydrologie ou la photosynthèse (éventuellement avec des paramètres différents), modifiant principalement, en « aval », les formalismes de la phénologie de la plante (semis, durée du cycle, récolte) et d'allocation du carbone aux différents organes de la plante (construction d'un rendement en grain par exemple) (Scholze et al. 2005). Ceci permet, tout en ajoutant au modèle la description d'un nouveau type de plante, les cultures, de conserver un cadre de modélisation unique et cohérent ; cela permet aussi de surmonter les différences qui peuvent exister dans les formalismes fondamentaux des

deux types de modèles. En effet, les modèles agronomiques, étant conçus avec une vision davantage « opérationnelle », tendent à être moins mécanistes et davantage paramétrés que les modèles de végétation globaux – effectuant de la sorte, en termes de modélisation, un arbitrage entre plasticité et efficacité davantage orienté vers l'efficacité. La photosynthèse par exemple y est le plus souvent calculée sur un pas de temps journalier, suivant une approche de type Monteith (1972) : le rayonnement solaire absorbé par la plante est converti en biomasse selon un paramètre d'« efficacité de conversion » affecté par les stress environnementaux. Cette approche est assez incompatible avec les modèles de biosphère, qui doivent pouvoir fonctionner couplés à un modèle d'atmosphère, et donc calculer les flux d'eau et de carbone à un pas de temps similaire (typiquement, 30 min) : pour cela, ils utilisent le plus souvent une approche de type Farquhar, résolvant la transpiration et la photosynthèse de façon couplée et à haute fréquence. Un modèle de culture pourra donc difficilement, à ce niveau-là par exemple, être inclus intégralement au sein d'un modèle de biosphère.

Pour des raisons tenant aux objectifs d'application et aux capacités des outils à disposition, la plupart des études mentionnées ci-dessus n'ont pas cherché à développer directement une modélisation globale, complète et cohérente des agrosystèmes, mais se sont concentrées sur des objectifs plus spécifiques en termes de cultures ou de régions. La question du nombre et du type de cultures à représenter reste éminemment ouverte (Scholze et al. 2005). La plupart des agro-DGVMs cherchent à représenter les cultures principales à l'échelle du globe que sont le blé, le maïs ou le soja. Agro-IBIS (Kucharik et Brye 2003) représente ainsi blé, maïs et soja sur l'Amérique du Nord, de même que Lokupitya et al. (2009). ORCHIDEE-STICS (Smith et al. 2010a) représente les mêmes cultures sur l'Europe. Le modèle GLAM ayant été développé et appliqué principalement à la culture de l'arachide, Osborne et al. (2007) appliquent GLAM-MOSES à l'arachide dans les régions tropicales. Le seul agro-DGVM doté d'une représentation globale et cohérente de la diversité des zones cultivées est à ce jour LPJ-mL (LPJ « managed land »), qui inclut une dizaine de PFTs cultureux pour les principales cultures tempérées et tropicales (Bondeau et al. 2007). On pourra trouver une comparaison plus détaillée de certains de ces modèles dans la récente revue de Arno et al. (2010). Tous ces modèles ne sont également pas au même niveau d'avancement quant au couplage avec l'atmosphère : certains peuvent d'ores et déjà fonctionner en mode couplé (GLAM-MOSES, LPJ-mL), pour d'autres le couplage est en cours de réalisation (ORCHIDEE-STICS).

3. Positionnement et objectifs de la thèse

3.1 La modélisation des cultures au sein d'ORCHIDEE

Au sein de l'IPSL, l'introduction de l'agriculture dans le modèle de surface ORCHIDEE a été l'objet des travaux de thèse de Sébastien Gervois puis de Pascal Smith. L'approche adoptée, légèrement différente de l'approche suivie par la plupart des modèles telle que décrite ci-dessus, a consisté, non à introduire explicitement dans ORCHIDEE une description des zones cultivées, mais à associer le modèle de surface avec le modèle de cultures STICS. Dans sa version d'origine, ORCHIDEE décrit la végétation globale à l'aide de 12 PFTs (sans compter le sol nu), dont 8 pour les ligneux, 2 pour les herbacées (photosynthèse en C3 ou en C4) et 2 pour les cultures (idem). Les cultures y sont en fait représentées identiquement aux herbacées, avec simplement certaines modifications de paramètres : productivité photosynthétique amplifiée de 25% (pour simuler l'effet de la gestion humaine), phénologie très légèrement différente. L'association ORCHIDEE-STICS vise, pour les PFTs agricoles, à assimiler dans ORCHIDEE, au point de grille considéré, les variables-clés simulées par STICS en réponse au même climat de ce point de grille - variables telles que l'indice foliaire (LAI, *Leaf Area Index*), contraint par le calendrier agricole (date de semis et date de récolte), et qui est une

variable-clé des échanges végétation-atmosphère en tant que support de la photosynthèse et de la transpiration. La justification de cette approche conservant intégralement le modèle agronomique parallèlement au modèle de biosphère est de pouvoir profiter des développements apportés à STICS pour représenter la diversité des zones cultivées. En effet, STICS est un modèle générique, initialement développé pour le blé et le maïs, mais qui a été adapté à d'autres cultures tempérées comme le soja, la betterave, le tournesol, le colza, la vigne... Pour l'heure, ORCHIDEE-STICS simule blé, maïs et soja, et a été appliqué à l'échelle de l'Europe - où les zones cultivées représentent entre 30 et 40% des surfaces - pour y simuler la productivité agricole, améliorant aussi substantiellement la simulation de la phénologie de la végétation à l'échelle régionale (Smith et al. 2010a). L'impact des zones cultivées sur le bilan de carbone européen et l'impact de la variabilité climatique sur ce bilan ont également été étudiés (Smith et al. 2010b).

Bien que STICS ait, à terme, vocation à être adapté à la représentation de certaines cultures tropicales telles que la canne sucre, ORCHIDEE-STICS reste pour l'instant applicable essentiellement aux zones tempérées. Des développements restent donc nécessaires pour rendre compte dans le modèle des zones cultivées tropicales, et étudier les interactions climat-agriculture dans ces régions. Ceci constitue précisément l'objet de cette thèse. L'approche suivie pour cela se distingue d'ORCHIDEE-STICS : il s'agit, plus « classiquement » d'inclure directement dans le modèle ORCHIDEE des formalismes spécifiques des cultures pour les régions tropicales, formalismes qui seront issus d'un modèle agronomique préexistant. Il s'agira donc *in fine* d'une version différente d'ORCHIDEE, distincte d'ORCHIDEE-STICS. Les raisons pour cela sont diverses, et tiennent en partie à des considérations stratégiques sur le développement général d'ORCHIDEE et son organisation dans le temps, mais reposent aussi sur des considérations méthodologiques. En effet, l'approche adoptée pour ORCHIDEE-STICS présente, fondamentalement, l'inconvénient de simuler « en double » le fonctionnement des cultures sur les points de grille contenant des zones agricoles : la simulation par STICS et celle par ORCHIDEE. Cette redondance peut générer des incohérences si les deux simulations divergent, par exemple en termes de bilan d'eau du sol – même si Gervois et al. (2004) indiquent que de telles divergences restent en général faibles, du moins pour des sites situés en France. Bien que le couplage ORCHIDEE-STICS présente, comme il a été dit, certains avantages, une approche plus directe sera donc utilisée dans cette thèse.

Il s'agira d'inclure dans ORCHIDEE, en lieu et place du PFT « plantes agricoles en C4 » (qui représente donc, dans la version d'origine, des herbacées naturelles), des formalismes issus du modèle agronomique SARRAH (Dingkuhn et al. 2003), développé au sein du CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) pour simuler le fonctionnement de céréales tropicales en C4 telles que le mil ou le sorgho, principalement en Afrique de l'Ouest (Sultan et al. 2005, Baron et al. 2005, Mishra et al. 2008). SARRAH est fondamentalement un modèle agronomique assez simple – relativement à CERES, APSIM ou STICS par exemple - mais qui conserve une approche mécaniste robuste: il combine, assez classiquement, une croissance potentielle, fonction du rayonnement et de son interception par le couvert (une approche de type Monteith, donc) avec un frein hydrique ; ceci est complété par un module phénologique basé sur le concept de sommes de degré.jours (pour structurer le cycle de végétation), par une description dynamique du couvert avec un schéma d'allocation évoluant au cours du cycle, et par une élaboration physiologique du rendement (compétition source-puits). Cette simplicité en fait un modèle idéal pour l'utilisation qui est envisagée ici – l'introduction dans un modèle global de végétation.

Ce choix du modèle SARRAH s'est fait en amont de cette thèse, et, au delà des qualités du modèle mentionnées ci-dessus, résulte également d'une collaboration préexistante entre un

des encadrants de la thèse (Benjamin Sultan) et l'équipe du CIRAD développant ce modèle, collaboration s'inscrivant en particulier dans le cadre du projet international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine). Cette thèse s'est elle aussi largement déroulée dans le cadre d'AMMA – et a d'ailleurs bénéficié de façon importante de la dynamique, de l'ampleur et de la richesse scientifique de ce projet, ne serait-ce qu'à travers les collaborations et les nombreuses interactions avec d'autres groupes de recherche, grandement facilitées dans un tel contexte. Dans ce contexte, une partie importante du travail accompli dans cette thèse porte sur l'Afrique de l'Ouest, zone d'étude du projet AMMA. Ce cadre s'élargit par la suite à l'Afrique et l'Inde, régions tropicales où sont largement présentes les cultures de céréales (mil/sorgho) simulées par SARRAH.

3.2 Objectifs et plan de la thèse

Par rapport aux deux aspects de la problématique climat/agriculture exposés dans cette introduction – impact du climat sur les agrosystèmes, et rétroaction des surfaces cultivées sur le climat – et pouvant être abordés à travers la représentation explicite des cultures dans un DGVM, cette thèse se focalise essentiellement sur le versant « modélisation à grande échelle des impacts du climat sur la productivité agricole ». Même si les outils développés dans le cadre de cette thèse pourront être utilisés à cette fin, on n'abordera que peu, dans cette thèse, la problématique de la rétroaction des surfaces cultivées sur le climat. Il s'agira essentiellement de développer un agro-DGVM et de l'appliquer à la simulation des rendements à grande échelle en région tropicale.

L'étude des impacts climatiques dans les régions tropicales est en effet particulièrement importante dans la mesure où ces zones sont souvent considérées comme les plus vulnérables à la variabilité et au changement climatique (GIEC, Résumé à l'intention des décideurs du Groupe de travail II, 2007). En effet les impacts du climat sur la production agricole y sont importants : celle-ci y est fortement dépendante du climat, en particulier, dans les régions subtropicales sèches, des précipitations. L'agriculture, excepté en Inde, y est très majoritairement pluviale : par exemple seuls 4% des surfaces d'Afrique Sub-Saharienne sont irriguées, selon la Banque Mondiale (World Bank, 2007). Ces régions sont d'autre part exposées à une variabilité climatique particulièrement importante : par exemple la variabilité associée à l'ENSO (El Nino Southern Oscillation), dont les impacts sont particulièrement marqués dans les Tropiques ; ou encore la variabilité des différents systèmes de mousson. Ainsi les variations de la mousson ouest-africaine au cours de la seconde moitié du XX^e siècle (sécheresse des années 1970 et 1980 – Dai et al. 2004) constituent le signal climatique le plus important à l'échelle globale, sur cette période, en termes de précipitations (Trenberth et al. 2007). Les conséquences de cette variabilité sur les populations peuvent alors être localement dramatiques : ces régions sont d'autant plus vulnérables qu'elles correspondent souvent à des pays en voie de développement, où les communautés dépendent directement des ressources naturelles locales (ne serait-ce que par l'agriculture vivrière), et où, d'une façon générale, la pauvreté limite, au niveau individuel comme au niveau institutionnel, la capacité à anticiper et faire face aux aléas climatiques. Du fait du poids de l'agriculture dans l'économie de ces pays, les impacts climatiques se font même sentir au niveau macroéconomique : l'agriculture représente par exemple, sur les dernières années, entre 15 et 20% du Produit Intérieur Brut (PIB) de l'Afrique Sub-Saharienne, selon la Banque Mondiale ; la part de l'agriculture dans le PIB indien était en 2005 de 18.3%³. Au-delà des impacts de la variabilité climatique, toute modification des ressources climatiques, à plus long terme, dans le cadre du changement climatique, peut avoir un effet déterminant sur la sécurité alimentaire de ces régions.

³ <http://www.geopopulation.com/pays/asie/inde/>

Cette vulnérabilité est d'une façon générale exacerbée par la forte croissance démographique. Ainsi le taux de croissance annuelle de la population, en Afrique, est de l'ordre de 3%, alors que celui de la production céréalière est de 1% (ONU, 2001). Sur les dernières décennies, la production alimentaire par habitant y a donc décroché – au contraire de la tendance pour le reste du monde –, le déficit étant comblé par un recours de plus en plus important à l'importation : Bationo et al. (2007) rapportent ainsi, par exemple, une augmentation de 185% des importations alimentaires entre 1974 et 1990, et de 295% pour l'aide alimentaire. Qui plus est, l'essentiel de l'augmentation de la production agricole s'est faite au travers de l'expansion des zones cultivées, et non de l'augmentation des rendements agricoles (Bationo et al. 2007). Dans les pays en développement en général, majoritairement situés aux basses latitudes (au « Sud »), la surface des zones agricoles a augmenté de 18.8% sur la période 1961-1999 – pendant qu'elle décroissait de -1.3% dans les pays développés (Balmford et al. 2005). Cette stratégie n'est à l'évidence pas durable pour assurer la sécurité alimentaire future des populations : ainsi, en prenant en compte l'augmentation prévue de la population dans les différentes régions, quantitative et qualitative (plus âgée, plus urbaine, plus développée), Collomb (1999) estime que, pour limiter au maximum la malnutrition, la production alimentaire devra d'ici 2050 être multipliée par plus de 5 en Afrique, et autour de 2 en Asie et Amérique Latine. Une telle augmentation ne peut à l'évidence être réalisée uniquement à travers l'expansion des surfaces agricoles, et devra nécessairement passer par l'augmentation de la productivité (Griffon 2006).

Dans ce contexte, être capable de mieux comprendre et simuler la réponse de la productivité agricole à la variabilité climatique (si l'on se place à une échelle saisonnière) ou au changement climatique (dans une perspective à plus long terme), afin de prévoir les impacts associés, constitue donc, pour les régions tropicales, un enjeu de recherche crucial en termes de sécurité alimentaire. Cet enjeu passe nécessairement par la prise en compte des céréales en C4 (maïs, mil, sorgho, notamment), étant donné le rôle crucial que jouent ces cultures dans la production alimentaire totale de ces régions, en particulier en Afrique (fig.6). Un des enjeux majeurs de cette thèse sera d'étudier dans quelle mesure un agro-DGVM peut être un outil intéressant pour répondre à cette problématique.

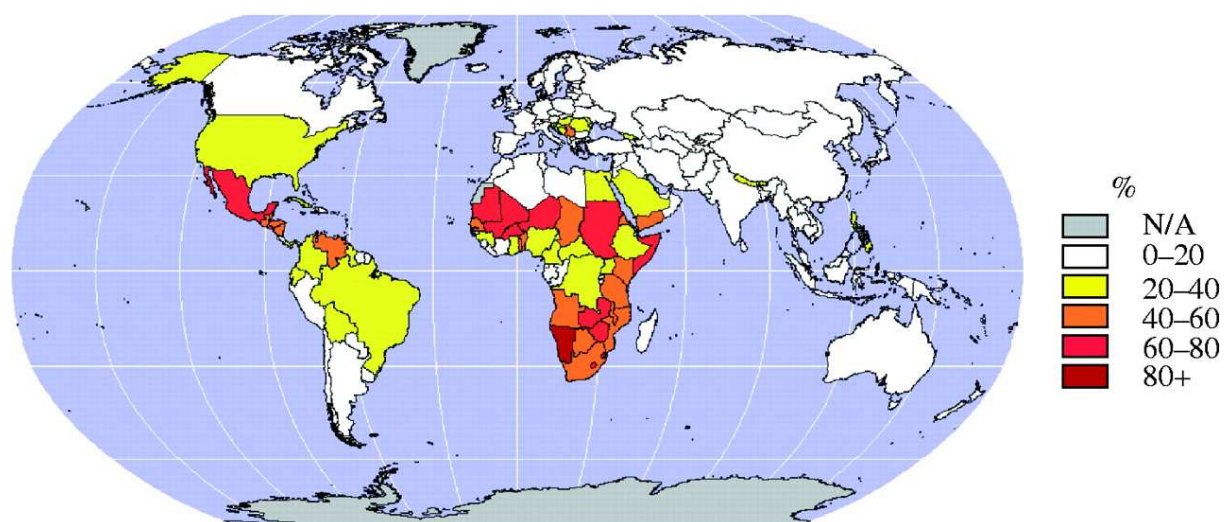


Fig.6 : Pourcentage des zones agricoles dévolues aux cultures en C4 en 2006. Tiré de Leakey et al. (2009), d'après les données de la FAO (Food and Agriculture Organization).

Si l'on ne développera pas expressément dans cette thèse les aspects liés à la rétroaction climatique des surfaces cultivées, on s'attachera néanmoins également à analyser l'effet, dans

le modèle, d'une représentation plus réaliste des zones cultivées sur les flux surface/atmosphère simulés et le climat (par rapport à la version standard d'ORCHIDEE représentant les cultures par des herbacées naturelles). Cet apport d'une meilleure représentation des zones cultivées est intéressant à étudier en région tropicale dans la mesure où les interactions surface-atmosphère peuvent y jouer un rôle important dans la variabilité climatique, à l'échelle saisonnière ou pluriannuelle. C'est notamment le cas en Afrique de l'Ouest, identifiée par exemple par Koster et al. (2004) comme une des régions du globe où le couplage humidité du sol-précipitation est le plus important. La végétation, en régulant ces interactions surface/atmosphère, peut donc jouer un rôle important dans la dynamique climatique locale. Par conséquent une représentation réaliste de la végétation est potentiellement un élément important de la simulation du climat dans de telles régions.

Aux objectifs de la thèse définis ci-dessus correspondront donc les trois parties de ce manuscrit :

- chapitre I : on y présentera les modèles utilisés (ORCHIDEE et SARRAH) et le développement de la représentation des cultures tropicales dans ORCHIDEE avec la nouvelle version, ORCHIDEE-mil. On y présentera également les éléments de validation sur site de cette nouvelle version, notamment des résultats de simulations sur le site de Wankama au Niger.
- Le chapitre II portera sur la validation du modèle à plus grande échelle. On analysera dans quelle mesure ORCHIDEE-mil permet de représenter correctement l'impact de la variabilité climatique sur la productivité agricole à grande échelle. Pour cela on comparera les rendements simulés et leur variabilité, à l'échelle de pays ou régions, aux données de la FAO, sur l'Afrique de l'Ouest et l'Inde.
- Enfin, le chapitre III portera sur l'apport d'ORCHIDEE-mil à l'étude des interactions climat/agriculture : on analysera l'impact d'une meilleure représentation des zones cultivées sur le climat simulé en Afrique de l'Ouest, et on utilisera ORCHIDEE-mil pour réaliser, à l'aide des simulations climatiques du GIEC (2007), des projections d'évolution des rendements agricoles en Afrique et en Inde.

Les résultats principaux et les perspectives seront discutés dans la conclusion.

I. Développement d'une représentation des cultures tropicales dans le modèle ORCHIDEE et comparaisons sur site

Ce premier chapitre consiste en une présentation des modèles utilisés (ORCHIDEE et SARRAH). On y présente le développement de la version ORCHIDEE-mil basé sur les simulations de SARRAH sur le site de Bambey au Senegal. On évaluera également les simulations de cette nouvelle version sur le site Wankama au Niger, pour lequel on dispose de données de végétation et de données de flux surface-atmosphère.

1. ORCHIDEE et SARRAH

1.1 Simulation de la biosphère par ORCHIDEE

ORCHIDEE (ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms) est un modèle numérique de la biosphère terrestre qui simule le fonctionnement de la végétation naturelle et des sols ainsi que leurs échanges avec l'atmosphère, à des échelles de temps allant de la demi-heure au millier d'années. Il repose sur une modélisation en trois modules couplés :

- Le module de surface SECHIBA (Ducoudré et al. 1993) a été le point de départ du développement d'ORCHIDEE. Ce schéma de surface a été mis au point pour prendre en compte les processus de surface dans le modèle de circulation atmosphérique (aGCM) LMDz, qui est lui-même une composante du modèle climatique couplé océan-atmosphère de l'IPSL. SECHIBA permet le calcul des différentes composantes des bilans hydrique et énergétique entre le sol, la végétation et les basses couches de l'atmosphère. Il résout au pas de temps de 30 minutes le cycle diurne des processus biophysiques rapides comme les flux turbulents (chaleur sensible, chaleur latente), l'accumulation de chaleur dans le sol et l'évolution des réservoirs d'eau à l'échelle d'une maille du modèle. Le calcul de la photosynthèse (Farquhar et al. (1980) pour les plantes en C3 et Collatz et al. (1992) pour les plantes en C4) et son interaction avec le bilan hydrique via la conductance stomatique (Ball et al. 1987) ont été ajoutés, faisant ainsi le lien entre SECHIBA et le module de dynamique du carbone STOMATE (Viovy 1996).

- Le module biogéochimique STOMATE simule la dynamique saisonnière des réservoirs de carbone que sont la végétation et le sol. Ces processus plus lents sont décrits au pas de temps de la journée. Néanmoins, pour simuler le cycle diurne du flux net de CO₂ (NEP ou NEE selon la convention de signe utilisée), les termes de la respiration sont calculés à la fréquence de l'heure et soustraits de celui de l'assimilation brute par photosynthèse (GPP) calculé par SECHIBA. La formulation de la phénologie inclut une modélisation du début du cycle saisonnier et de la sénescence de la végétation (Botta et al. 2000; Krinner et al. 2005). L'allocation des produits de la photosynthèse repose sur Friedlingstein et al. (1999) et la respiration autotrophe sur Ruimy et al. (1996). Les processus de conversion (« turnover ») entre réservoirs de carbone ou différentes classes d'âge de feuilles ont été décrits par Sitch et al. (2003) et Krinner et al. (2005). La décomposition de la litière et la dynamique du carbone dans le sol ont été adaptées du modèle CENTURY (Parton et al., 1988).

- Le module écologique LPJ provient du DGVM du même nom (Sitch et al. 2003), dont a été reprise la formulation de la dynamique de la végétation naturelle. Celle-ci inclut la compétition entre les différents types de plante, leur mortalité naturelle et la perturbation de leur équilibre par les feux. Ces processus sont simulés au pas de temps de l'année. LPJ dérive lui-même du modèle bio-géographique BIOME (Prentice et al. 1992), conçu pour simuler la

répartition spatiale de la végétation en fonction des conditions climatiques à l'équilibre. Cette partie du modèle n'a pas été utilisée lors des travaux conduits dans le cadre de cette thèse, car celle-ci n'a pas porté sur la végétation naturelle et son évolution mais sur la végétation anthropique (agricole, exploitée par l'Homme) et son fonctionnement en conditions fixes (distribution spatiale prescrite).

Le concept de PFT (Plant Functional Type) permet de prendre en compte la diversité des espèces végétales au sein d'une maille de modèle tout en simplifiant la représentation (et en économisant du temps de calcul, proportionnel au nombre de catégories choisies et jeux de paramètres associés). Un PFT est une unité de couverture végétale considérée comme répondant de manière homogène aux facteurs environnementaux considérés. Le regroupement des espèces en PFTs se fait selon plusieurs critères écophysiologiques :

- structurel ; les arbres (ligneux) sont distingués des prairies (herbacées naturelles) et cultures (herbacées agricoles)
- architectural ; les arbres ont des feuilles (feuillus) ou des aiguilles (conifères)
- phénologique ; les arbres perdent leurs feuilles (caducifoliée) ou les gardent pendant l'hiver (sempervirente)
- bioclimatique ; les aires de croissance des arbres sont dominées par un climat moyen boréal, tempéré ou tropical
- photosynthétique ; la photosynthèse des herbacées est de type C3 ou C4 (efficience de l'utilisation de l'eau et du CO₂ plus élevée)

ORCHIDEE représente la couverture végétale globale à l'aide de 12 PFT et du sol nu (tab1.1).

N°	PFT
1	<i>Forêt tropicale de feuillus sempervirents</i>
2	<i>Forêt tropicale de feuillus décidus</i>
3	<i>Forêt tempérée de conifères sempervirents</i>
4	<i>Forêt tempérée de feuillus sempervirents</i>
5	<i>Forêt tempérée de feuillus décidus</i>
6	<i>Forêt boréale de conifères sempervirents</i>
7	<i>Forêt boréale de feuillus décidus</i>
8	<i>Forêt boréale de conifères décidus</i>
9	<i>Herbacées naturelles en C3</i>
10	<i>Herbacées naturelles en C4</i>
11	<i>Cultures en C3</i>
12	<i>Cultures en C4</i>

Tab.1.1 : PFTs du modèle ORCHIDEE.

Un biome dans ORCHIDEE devient ainsi une combinaison des 12 PFTs et du sol nu permanent dans des proportions particulières. Au sein d'une maille élémentaire du modèle, tous les PFTs peuvent a priori co-exister. En mode statique (LPJ désactivé), c'est la carte de végétation qui prescrit les fractions de surface couvertes par chacun des PFTs. Les deux PFTs « cultures en C3 et en C4 » sont dans la version standard d'ORCHIDEE de simples herbacées dont la croissance est pilotée uniquement par les conditions climatiques, sans gestion par l'Homme. Leur différence avec les PFT « herbacées naturelles » réside dans le maximum d'indice foliaire (LAI, *Leaf Area Index*) et le rendement de la photosynthèse, qui ont été augmentés pour tenir compte implicitement de la fertilisation et de l'amélioration génétique. Dans la version du modèle qui a été utilisée et développée ici, le cycle des nutriments, comme

l'azote, n'est pas explicitement simulé. La représentation explicite du cycle de l'azote n'a été introduite que très récemment dans le modèle (Zaehle et Friend 2010). Concernant l'hydrologie du sol dans le modèle, il s'agit de la version à « double bucket » (Choisnel 1977, Ducoudré et al. 1993, de Rosnay et Polcher 1998), autrement dit à deux réservoirs : un de surface indépendant par PFT et un réservoir profond commun à tous les PFTs. La taille de chacun des réservoirs dépend des apports d'eau (précipitations) et des pertes (évapotranspiration, ruissellement). La profondeur utile moyenne est prescrite par défaut à 2 m et la réserve utile à 300 mm (150 mm/m).

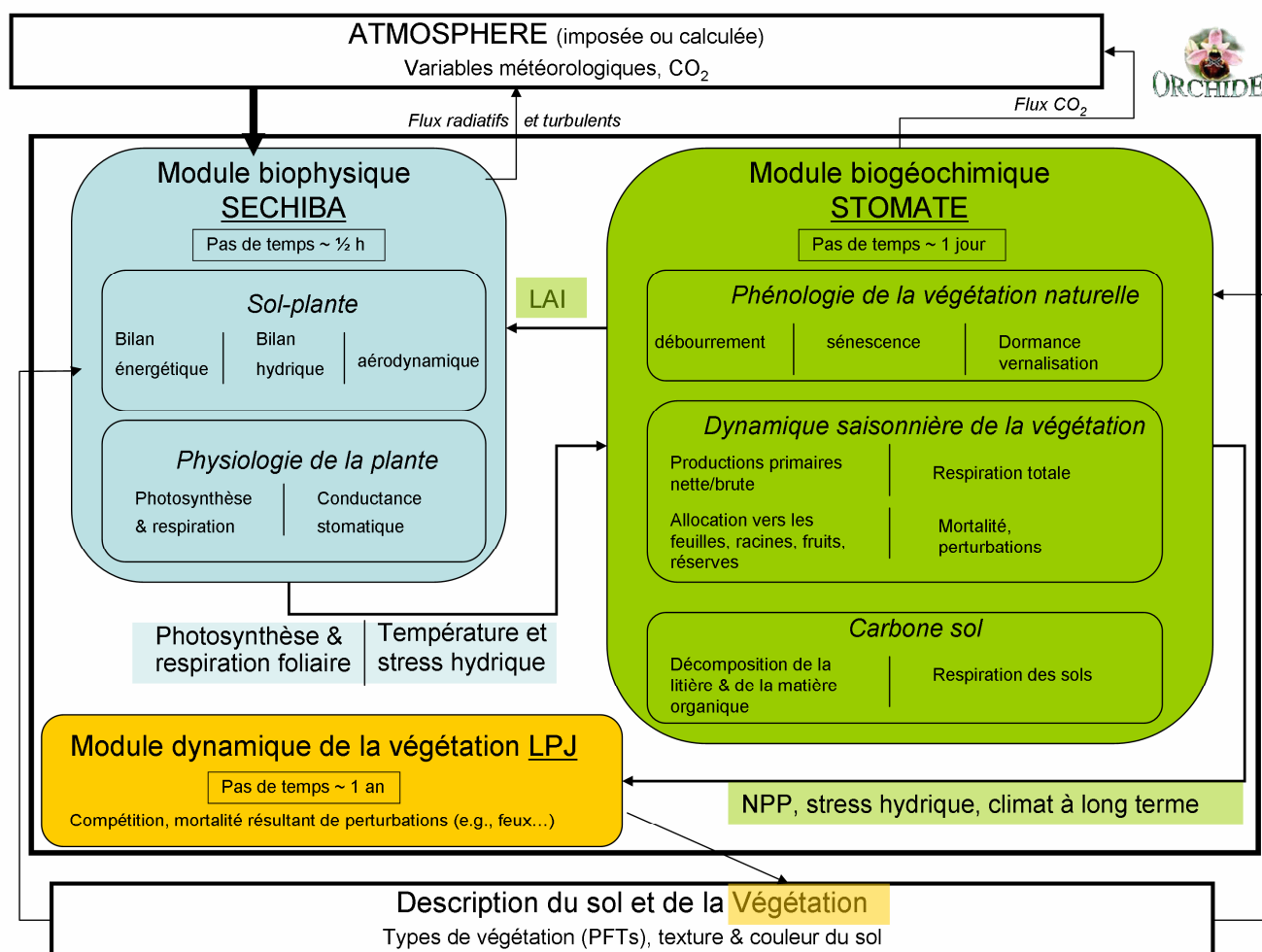


Fig.1.1 : schéma du fonctionnement des différents modules d'ORCHIDEE. LAI : indice foliaire. NPP : production primaire nette. Les flèches correspondent à des transferts de variables.

La figure 1.1 récapitule le fonctionnement d'ORCHIDEE avec ses interactions entre modules. Les variables climatiques sont reçues de l'atmosphère via le module SECHIBA. Les sorties du modèle, en termes de flux de surface (de flux turbulents : flux de chaleur sensible (H) et de chaleur latente (LE) ; de flux radiatifs de courte longueur d'onde (SW) et grande longueur d'onde (LW) ; de flux de CO₂) peuvent, en mode couplé surface-atmosphère, devenir des variables d'entrées du modèle d'atmosphère. Ces flux de surface sont calculés à l'échelle de la maille. SECHIBA transmet à STOMATE principalement la GPP, la respiration de croissance associée, et les profils de température et d'humidité dans le sol, calculés à partir des données de forçage. L'assimilation (GPP) est pilotée par la phénologie propre à chaque PFT. STOMATE alloue ensuite la biomasse aux réservoirs de carbone et calcule les autres termes de la respiration. Il retourne à SECHIBA le LAI (pour chaque PFT), résultant de la

conversion des assimilats en surface foliaire. Le LAI, dont dépendent l'albédo et la rugosité, représente l'état de la végétation et rétroagit sur les bilans de surface et la capacité photosynthétique du couvert. Le LAI est défini ici comme la surface foliaire verte (une seule face de feuille) totale d'un PFT, rapportée à la surface de sol occupée par le PFT.

Pour la description du fonctionnement de la végétation, et en particulier des herbacées en C4, dans ORCHIDEE, le lecteur est renvoyé vers Krinner et al. (2005). Les éléments de ce fonctionnement pertinent pour cette thèse seront présentés dans le tableau 2 qui compare en les résumant les différences dans les formalismes d'ORCHIDE et de SARRAH.

1.2 Simulation des cultures par SARRAH.

SARRAH (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques, version H) est un modèle agronomique développé par l'unité de recherche « Ecotrop » au CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) pour simuler le fonctionnement de céréales tropicales telles que le mil ou le sorgho (Dingkuhn et al. 2003). Il est appliqué principalement à l'Afrique de l'Ouest (Sultan et al. 2003, Baron et al. 2005, Mishra et al. 2008)

a. Un modèle de bilan hydrique à l'échelle de la parcelle : le DHC

A l'origine, le modèle s'articule essentiellement autour d'un calcul de bilan hydrique. A partir d'une combinaison de paramètres météorologiques, agronomiques et édaphiques, ce bilan permet de simuler des indicateurs de stress hydrique et des termes du bilan d'eau à l'échelle de la parcelle pour le calcul du rendement potentiel de la variété cultivée (Houndénou 1999, Samba et al. 2001). Il est utilisé comme une aide à la décision pour la prévision agricole à l'échelle régionale pour les pays du CILSS (Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) en Afrique de l'Ouest au sein du modèle DHC (Diagnostic Hydrique des Cultures) par l'Agrhymet et le CIRAD (Sow et Diagne 1998). Dans ce cadre les rendements simulés ont pu être validés à partir de données terrain de rendement réel sur plusieurs stations au Sénégal (Samba et al. 2001).

La simulation du bilan hydrique du modèle DHC est une approche dynamique des flux entre le sol, la plante et l'atmosphère (Reyniers 1994), dérivée du modèle BIP4 (IRAT, Montpellier). Les variables d'entrée sont le type de sol qui détermine la réserve utile potentielle, les coefficients culturaux, la vitesse racinaire, la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Le bilan hydrique du modèle utilise deux réservoirs : un en surface (20cm) et l'autre d'une épaisseur variable en fonction du front racinaire. La descente de ce front racinaire est pilotée par le stade de développement de la culture et limitée par la progression du front d'humectation (Baron et al. 1999). Pour un type de sol, le modèle évalue classiquement la consommation en eau du système sol/plante (autrement dit, l'évapotranspiration réelle, ETR) à partir de l'humidité du sol HR, de la demande climatique ETP, et de l'ETM, l'évapotranspiration maximale, c'est-à-dire le maximum que peut transpirer la plante en conditions hydriques optimales. L'ETM est obtenue en multipliant l'ETP par un coefficient cultural Kc qui varie selon le stade de développement de la culture (les valeurs sont prescrites). Ce calcul de l'ETR se fait au pas de temps journalier, et est paramétré selon l'équation d'Eagleman (1971) :

$$ETR = 0.732 - 0.05*ETM + (4.97*ETM - 0.661*ETM^2)*HR - (8.57*ETM - 1.56*ETM^2)*HR^2 + (4.35*ETM - 0.88*ETM^2)*HR^3$$

La satisfaction de la culture d'un point de vue hydrique est exprimé par le rapport ETR/ETM : naturellement, plus ce rapport est faible, plus le stress hydrique est important. Sur la base de cet indice, le modèle DHC détermine un coefficient de réussite de la culture (IRES) prenant en compte la satisfaction hydrique pendant le cycle correspondant à la croissance et celle pendant les phases plus sensibles. Le rendement (qui est alors un rendement potentiel sous contrainte hydrique) est déduit de ce coefficient IRES et de deux autres coefficients empiriques, qui ont été calibrés à partir de rendements observés lors d'enquêtes en milieu paysan (enquêtes sur 5 pays, 3 années, 10 villages par pays à différentes latitudes).

b. La prise en compte de la dynamique de la biomasse.

Dans la continuité de ce bilan hydrique, une nouvelle version de SARRAH a été développée incluant cette fois-ci explicitement le calcul de la végétation, de son bilan carboné et de sa phénologie. D'autre part l'évapotranspiration est désormais séparée explicitement en transpiration de la plante et évaporation du sol.

Le modèle décrit cette dynamique de la biomasse en subdivisant le cycle de la plante en 4 grands phases phénologiques :

- la phase juvénile qui caractérise la période végétative pendant laquelle il y a installation du peuplement
- la phase reproductive qui comprend le début de la floraison
- la phase de fin de floraison et de début de maturation qui correspond au remplissage des grains
- la dernière phase de maturation, qui correspond à la dessiccation des grains.

Ces 4 grandes phases correspondent plus précisément dans le modèle à différents stades phénologiques, dont les durées sont définies, de façon classique d'un point de vue agronomique, par des seuils de cumul de température: une phase dure le nombre de jours nécessaires à l'accumulation d'une certaine somme de degrés Celsius, ce cumul étant calculé sur les données de températures journalières. Seules les températures journalières au-dessus d'une température de base donnée sont prises en compte (pour rendre compte du ralentissement du développement de la plante en cas de conditions froides). Pour les variétés à caractère photopériodique (dont l'enchaînement des phases de développement est sensible à l'évolution de la durée du jour), la phase juvénile est suivie d'une phase dont la durée est variable et calculée d'après la longueur du jour (Dingkhun et al. 1995, Dingkuhn et Asch 1999).

L'assimilation de carbone est décrite selon une approche de type Monteith (1972) : le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par le couvert végétal est converti en biomasse selon un paramètre de conversion, dont l'évolution au cours du cycle est prescrite (pour tenir compte de la baisse des capacités photosynthétiques de la plante en fin de cycle). Le stress hydrique module l'assimilation photosynthétique : ce stress est toujours calculé comme ci-dessus, à la différence que l'indice de stress hydrique est restreint à la perte en eau par la plante, autrement dit considère le rapport Tr/Tr_{Pot} (transpiration réelle sur transpiration potentielle).

Le carbone assimilé est réparti dans les différents compartiments de la plante de façon différente au cours des différents stades phénologiques, afin de refléter un véritable processus d'élaboration du rendement :

- pendant la phase de développement végétatif regroupant la phase juvénile et la phase reproductive, la répartition entre feuilles, tiges et racines se fait selon des règles allométriques empiriques ; la croissance au cours du dernier stade de cette phase définit un rendement potentiel, que la plante va essayer d'atteindre au cours de la phase suivante de remplissage des grains ;

- pendant la phase de maturation regroupant le remplissage des grains et la dessiccation, le modèle utilise un schéma de type source-puits : les assimilats sont prioritairement affectés au remplissage des grains, avec même la possibilité de réallouer une partie de la biomasse des feuilles vers les grains pour satisfaire cette demande si l'état de la plante le permet ; le remplissage des grains est également modulé par le stress hydrique : il est donc doublement sensible au stress hydrique.

L'interception du rayonnement dépend de l'indice foliaire (LAI) du couvert, lui-même dérivé de la biomasse foliaire et de la surface massique des feuilles (SLA, *Surface Leaf Area*). Une des particularités de SARRAH consiste, pour le SLA, à ne pas se contenter de paramètres fixes, mais à simuler une évolution dynamique, en se basant sur une dérivée de la biomasse foliaire censée représenter l'âge des feuilles (une plante jeune ayant typiquement des feuilles plus fines, donc pouvant « faire » davantage de LAI avec une même biomasse, qu'une plante plus âgée).

SARRAH combine donc une croissance potentielle, fonction du rayonnement et de son interception par le couvert, avec un frein hydrique ; ceci est complété par un module phénologique, par une description dynamique du couvert avec un schéma d'allocation évoluant au cours du cycle, et par une élaboration physiologique du rendement (compétition source-puits).

A la lumière de cette brève description, on constate que SARRAH correspond à la description générale des modèles agronomiques qu'on a pu faire dans l'introduction : c'est un modèle ayant vocation à fonctionner à l'échelle de la parcelle, à un pas de temps journalier, avec des données météo mesurées, sur une année. La modélisation fait intervenir des concepts qui sont plutôt propres à l'agronomie : stades phénologiques et temps thermique (somme de degrés-jours), rendement potentiel, coefficient cultural, ... Son but est de simuler essentiellement le développement de la plante et d'évaluer le rendement qu'elle produit : cet objectif explique que, bien que privilégiant simplicité et robustesse, le modèle reste fondamentalement assez fortement paramétré (par exemple au niveau du schéma d'allocation).

SARRAH-mil a été calibré et validé sur différents sites expérimentaux indépendants au Sénégal (Baron et Sarr, non publié). La biomasse et les rendements sont simulés de façon satisfaisante sur plusieurs années, et dans différentes conditions culturales (selon irrigation et fumure). On notera néanmoins - et cela sera rediscuté par la suite - qu'en situation « réelle » (dans les parcelles cultivées par les paysans), le rendement observé est souvent bien plus faible qu'en station expérimentale : on constate que SARRAH simule plutôt les meilleurs rendements obtenus parmi une population d'agriculteurs. Ne prenant en compte que le climat (essentiellement pluie, rayonnement et température), le modèle ne peut représenter la variabilité issue de facteurs non-climatiques, comme la fertilité des sols, les adventices, les maladies... : il simule donc un rendement potentiel sous contrainte climatique.

La figure 1.2 résume schématiquement le déroulement d'un cycle cultural dans SARRAH.

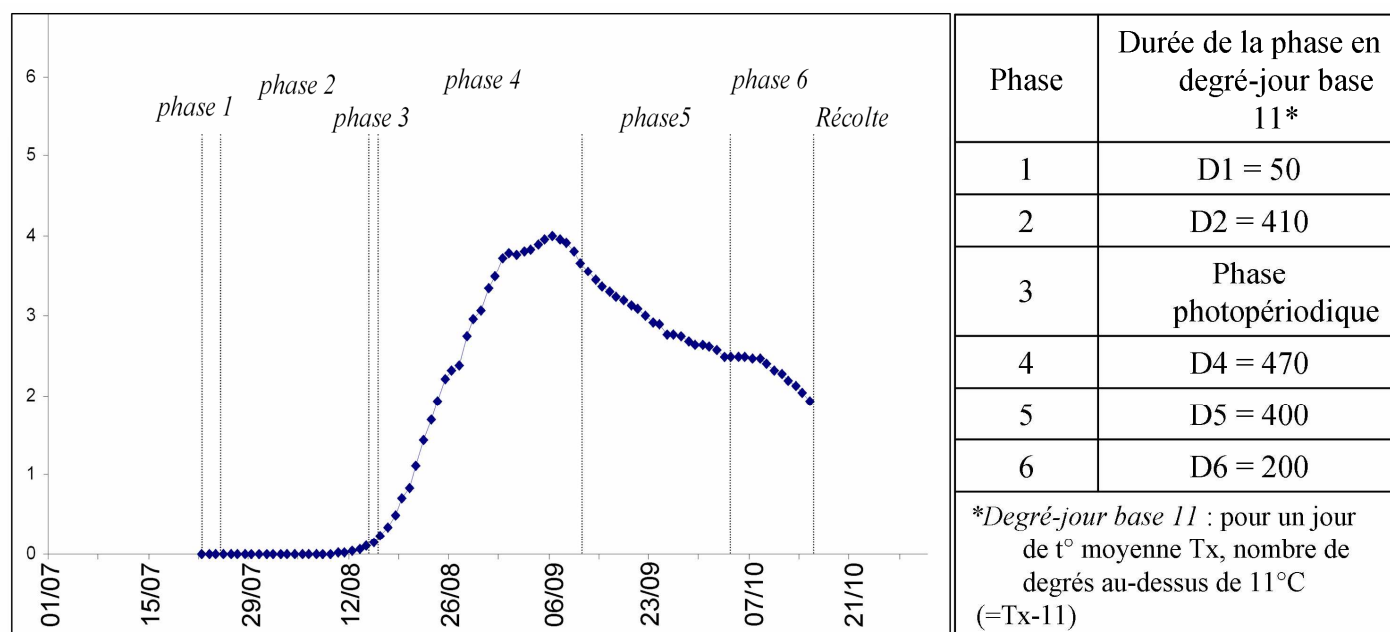


Fig.1.2 : Positionnement des différents stades phénologiques dans un cycle de SARRAH, et sommes de degrés-jours correspondantes. Le cycle correspond à une simulation de SARRAH sur le site de Bambey en 1997 (voir section suivante). Phase 1 : pré-levée (croissance racinaire). Phase 2 : levée et développement végétatif. Phase 3 : phase photosensible : le développement végétatif se poursuit tant qu'une certaine condition sur l'évolution de la durée du jour n'est pas remplie (ne dure qu'un jour pour les variétés non-photopériodiques, comme ici). Phase 4 : développement végétatif, s'achève sur l'anthèse – cette phase conditionne le potentiel de rendement. Phase 5 : formation et remplissage des grains, i.e. élaboration du rendement. Phase 6 : dessiccation des grains.

1.3 Résumé comparaison ORCHIDEE/ SARRAH

Dans ce tableau sont résumées les principales différences entre ORCHIDEE et SARRAH dans la simulation des plantes cultivées en C4 en termes de phénologie et de dynamique de végétation.

	SARRAH	ORCHIDEE
Début de cycle	Date de semis calculée selon un test sur les pluies et le stress hydrique.	Fonction d'une somme de degrés-jour critique, de la température et de l'humidité du sol (Botta et al. 2000).
Production d'assimilats	Modèle de type Monteith : conversion du rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par le couvert végétal en matière sèche par un coefficient de conversion, avec diminution par un facteur de stress hydrique.	Modèle de type Farquhar pour C4 (Collatz et al. 1992) : assimilation et conductance stomatique sont calculées simultanément ; l'activité photosynthétique dépend des taux maximum de carboxylation et de régénération de la Rubisco (paramètres rehaussés par rapport aux prairies naturelles).
Dynamique d'allocation (et translocation) de la biomasse	<p>Cycle divisé en stades phénologiques déterminés par des sommes de degrés jours (voir fig.1.2 page précédente)</p> <p>Règles d'allocation allométriques entre compartiments pour les phases végétatives (stades 1 à 4).</p> <p>La phase 3 permet éventuellement d'inclure un photopériodisme : le passage à la phase 4 se fait alors selon un test de durée du jour.</p> <p>Pendant la phase reproductive (stade 5), les grains sont remplis avec une éventuelle translocation depuis les feuilles, afin de remplir un « puits » dimensionné par l'accroissement de biomasse en phase végétative</p>	<p>L'allocation aux feuilles, tiges, racines, réserves, est fonction des stress subis par la plante (lumineux, hydrique, azoté) (Friedlingstein et al. 1999); l'allocation aux fruits est une taxe constante de 10% des assimilats ; allocation totale aux réserves en fin de cycle (sénescence).</p> <p>Pas d'allocation aux feuilles au-delà d'un LAI_{max} prescrit (ni aux réserves si celles-ci sont équivalentes à LAI_{max}).</p> <p>Translocation depuis les réserves vers les feuilles en début de cycle, jusqu'à atteindre $LAI_{max} / 2$.</p>
Respiration	Respiration de maintenance fonction de la biomasse et de la température.	<p>Respiration de maintenance fonction de la biomasse et de la température ;</p> <p>Respiration de croissance, correspondant à 30% des allocations aux différents tissus.</p>
Indice Foliaire (LAI)	$LAI = BiomasseFeuilles * SLA$ SLA (Specific Leaf Area) calculé en fonction de l'âge des feuilles : maximum au début, décroissance, puis minimum.	$LAI = BiomasseFeuilles * SLA$, avec SLA constant.
Sénescence	En phase ultime de mûrissement des grains (stade 6), sénescence quand la respiration devient supérieure à l'assimilation ; puis récolte, lorsqu'est atteinte la somme totale de degrés jours.	Fonction de l'humidité du sol, de la température, d'un âge critique des feuilles : chaque compartiment de la plante perd alors quotidiennement une fraction de biomasse.

Tab.1.2 : résumé des principales différences entre ORCHIDEE et SARRAH dans la simulation des plantes cultivées en C4 en termes de phénologie et de dynamique de végétation.

2. Nouvelle représentation des cultures tropicales dans ORCHIDEE

Comme il a été dit en introduction, il ne s'agit pas ici de « coupler » véritablement les deux modèles ORCHIDEE et SARRAH, de la façon dont cela a été fait pour ORCHIDEE-STICS ; il s'agit d'incorporer directement dans ORCHIDEE certaines paramétrisations de SARRAH, afin d'obtenir une représentation plus satisfaisante des cultures en C4. Cette approche « directe » d'introduction de règles agronomiques dans le modèle global est en général celle adoptée dans les autres modèles globaux de végétation (IBIS et LPJ notamment).

On commence par comparer les simulations produites par les deux modèles placés dans la même situation, c'est-à-dire au même site avec le même climat. Les variables servant à comparer les deux sorties seront essentiellement les biomasses et les LAI, variables-clefs témoignant du développement de la plante et de son impact sur les échanges surface-atmosphère.

2.1 Comparaison des deux modèles sur le site de Bambey

A titre d'élément de comparaison, on dispose de simulations de SARRAH, sur 2 années (1996 et 1997) sur le site expérimental de la station de recherche de Bambey, près de Dakar, au Sénégal (16.5°E, 15°N – fig.1.3 ci-dessous). Bambey se situe en zone tropicale sèche, avec des précipitations variant typiquement entre 350 et 650 mm, et des températures autour de 25-30°C.

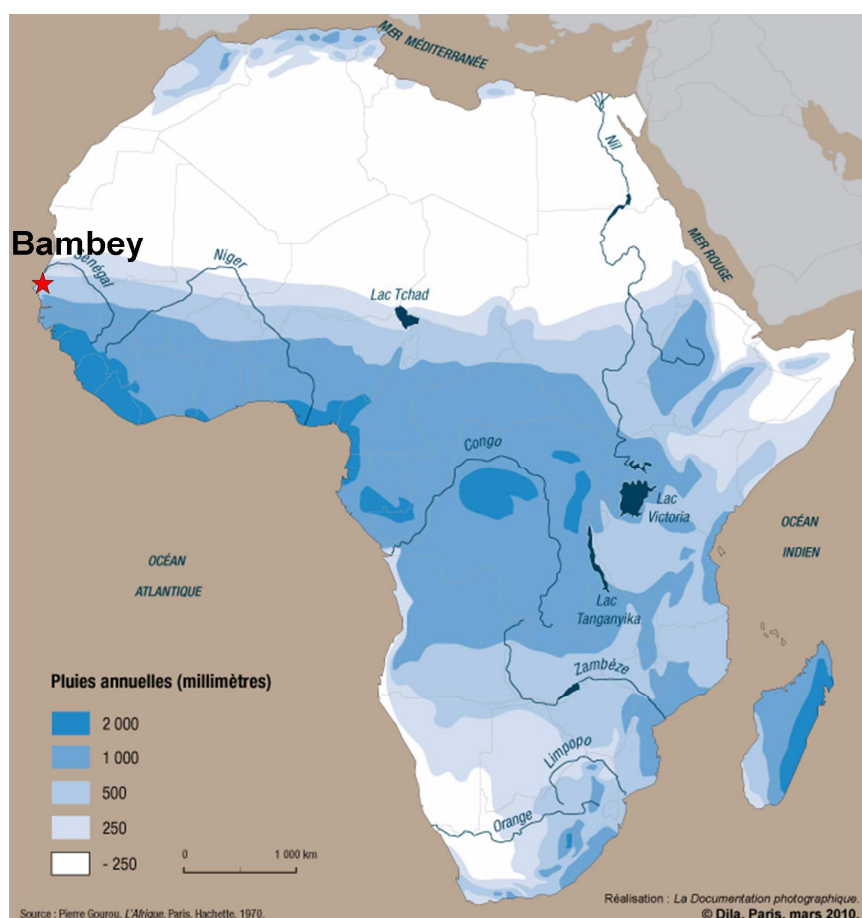


Fig.13 : Localisation de Bambey en Afrique (16.5°E, 15°N) sur une carte de pluviométrie moyenne.

La saison de croissance de la végétation est bien sûr la saison des pluies entre juin et octobre. Les simulations de SARRAH sur ce site ont fait l'objet de validation par des mesures de LAI et de biomasses, obtenues en particulier en conditions hydriques différentes (irrigation ou pluvial).

SARRAH simule correctement le LAI et les biomasses - y compris le rendement, qui correspond à la biomasse des grains (Sultan et al. 2005, Baron et al. 2005). On considère donc les simulations de SARRAH sur ce site comme un « proxy » des observations – autrement dit comme la « vérité terrain ».

Les données météorologiques mesurées sur ce site, et ayant servi à forcer le modèle SARRAH, sont au pas de temps journalier. Cependant ORCHIDEE fonctionne avec un forçage au pas de temps semi-horaire⁴. Les données journalières de Bambey doivent donc être désagrégées. Pour les données de rayonnement et de température, on utilise le cycle journalier moyen des données NCC (Ngo-duc et al. 2005) : ces données correspondent aux réanalyses NCEP/NCAR (National Center for Environmental Predictions / National Center for Atmospheric research) corrigées par les données mensuelles du CRU (Climate Research Unit, University of East Anglia). On extrait pour les 2 années 1996 et 1997 les données NCC au point de grille correspondant à Bambey, et on applique aux données journalières de Bambey le cycle journalier moyen correspondant. Pour la pluie, on procède autrement : on utilise les données de probabilité de pluie du satellite Meteosat2, calculées toutes les 15mn, sur l'année 2004, pour estimer une distribution journalière typique de la pluie. Cette distribution est alors appliquée aux données de pluies de Bambey. ORCHIDEE peut donc être forcé par les données de Bambey désagrégées au pas de temps de 6h.

La figure 1.4 compare les simulations de SARRAH et ORCHIDEE pour l'année 1997, en termes de LAI et de biomasse. Les deux modèles sont donc forcés par le même climat. La même date de démarrage du cycle - celle du semis réel - a été prescrite aux deux modèles, de façon à pouvoir comparer exclusivement la dynamique du cycle. Notons qu'on réalise plusieurs itérations sur la même année afin d'initialiser le contenu en eau du sol, ce dernier étant par défaut dans le modèle à saturation en début de simulation (ce qui n'est pas réaliste dans notre situation, en Afrique de l'Ouest). En termes de texture de sol, SARRAH utilise les caractéristiques d'un sol sableux, alors qu'ORCHIDEE utilise les caractéristiques d'un sol moyen - tel que simulé sur l'ensemble du globe. Cette différence est certes gênante, mais améliorer la représentation de la diversité physique des sols dans ORCHIDEE est ici au-delà du sujet.

On constate que parce qu'ORCHIDEE simule essentiellement une herbacée, le cycle simulé est trop long : ceci est principalement dû à l'absence de récolte. De plus, la croissance en début de cycle est trop rapide et linéaire : elle commence directement après le semis. ORCHIDEE ne simule pas le lent développement de début de cycle avec sa dynamique exponentielle. Cette croissance directe est permise par la présence, dans ORCHIDEE, d'un compartiment « réserve », qui apparaît sur la figure 1.4b : durant la saison sèche, ce compartiment reste plein (la ligne horizontale à 200 gC/m²), puis il est utilisé par la plante en début de cycle pour croître directement, alors que l'assimilation de carbone a à peine débuté. Ce compartiment est rempli à nouveau au cours du cycle, avec une allocation d'une certaine fraction des produits de la photosynthèse. Ce compartiment et cette dynamique sont à l'origine prévus dans le modèle pour les PFTs ligneux ou les herbacées pérennes, qui peuvent effectivement remobiliser des réserves en début de saison de croissance. Cependant, elle est

⁴ Il peut interpoler temporellement des forçages dont le pas de temps va jusqu'à 6 heures ; au-delà, il peut éventuellement utiliser des forçages mensuels à l'aide d'un « générateur de temps » recréant une variabilité journalière et horaire. Mais le pas de temps journalier n'est pas utilisable directement.

clairement irréaliste pour des herbacées annuelles comme des céréales : les réserves dont la plante dispose en début de cycle ne sont que celles du grain semé.

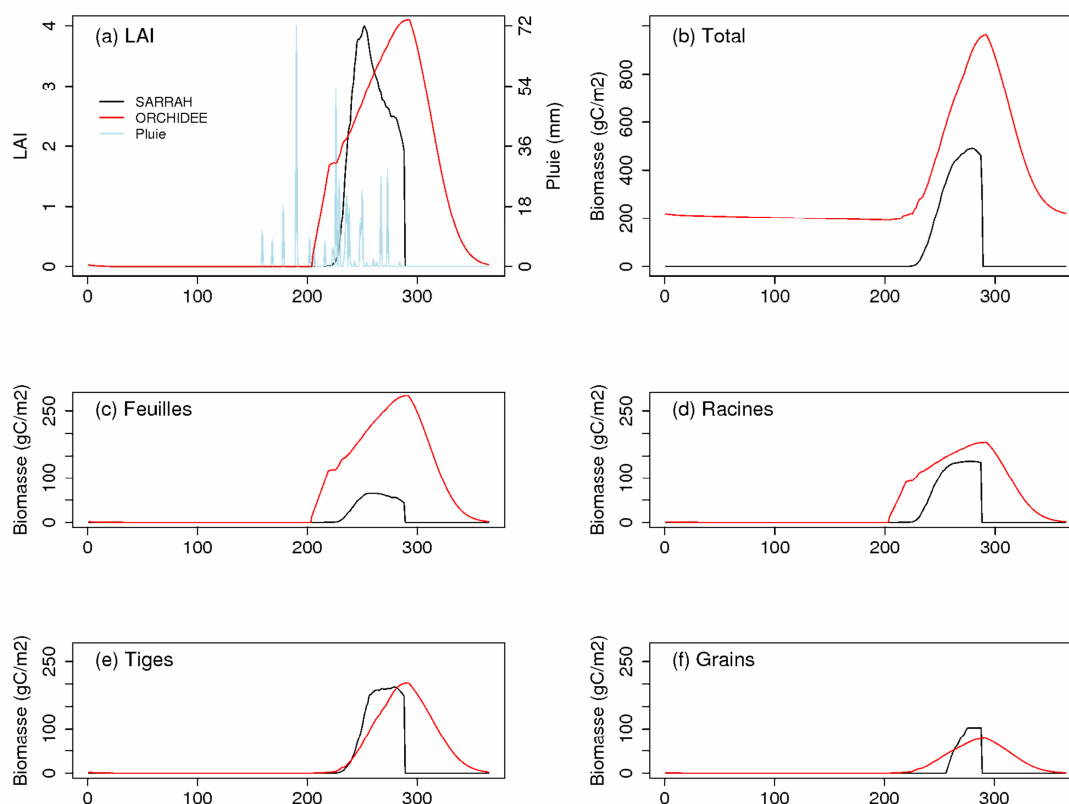


Fig.1.4 : Comparaison entre simulation par SARRAH (considérée comme un proxy des observations) et simulation par ORCHIDEE (dans sa version standard, mais en forçant le début de cycle à la date de semis réelle) pour : a) LAI, b) biomasse totale, c) biomasse foliaire, d) biomasse racinaire, e) biomasse des tiges, f) biomasses des grains, sur le site de Bambey en 1997. La pluie est indiquée en bleu clair sur le panel a).

La biomasse totale simulée dans ORCHIDEE est trop importante, à la fois à cause de ce compartiment « réserve » et d'une trop grande biomasse foliaire (fig.1.4c). Cette trop grande biomasse de feuilles est compensée dans ORCHIDEE par un SLA plus faible, ce qui explique que LAI soit du bon ordre de grandeur. Cependant, le fait que le SLA soit prescrit dans ORCHIDEE comme un paramètre constant implique que le LAI est directement proportionnel à la biomasse de feuilles : la dynamique du LAI ne peut donc reproduire celle de SARRAH, pour lequel le SLA suit une dynamique explicitement calculée d'après l'âge des feuilles.

2.2 Modifications apportées à ORCHIDEE

Pour transformer les herbacées naturelles simulées par ORCHIDEE en des cultures tropicales plus réalistes, l'essentiel des modifications consiste à : supprimer le compartiment réserve, inclure le schéma d'allocation de SARRAH (y compris l'élaboration du rendement avec la dynamique source-puits), et la paramétrisation du SLA. L'hypothèse qui est faite est qu'il n'est pas nécessaire d'apporter de véritables modifications en amont au niveau des processus hydrologiques ou de photosynthèse. Autrement dit les modifications ne seront apportées que dans la partie STOMATE d'ORCHIDEE. Comme il a été dit en introduction, cette approche est conforme avec celle suivie par d'autres groupes de modélisation (Scholze et al. 2005).

Les changements sont apportés à ORCHIDEE pour les processus listés dans le tableau 1.2. Ces modifications sont ensuite ajustées de manière à ce que la version résultante simule le cycle végétal (LAI et biomasse) de façon similaire à SARRAH sur l'année 1997. On présente ci-après les nouveaux formalismes introduits dans le modèle ORCHIDEE.

2.2.1 Croissance et développement

La culture peut soit être semée à une date prescrite, soit selon un critère de pluie censé approximer la décision de semis en milieu paysan, au sein d'une fenêtre de semis correspondant aux pratiques de la région étudiée (par exemple entre début mai et fin août en Afrique de l'Ouest): le semis a lieu lorsqu'il pleut plus de 20mm en un jour, ou 30mm en trois jours consécutifs. Ce critère devient plus souple quand la fin de la fenêtre de semis approche : après le jour 180 (fin juin), le cycle débute quand la pluie cumulée des 3 derniers jours atteint 10mm. La biomasse de semis est prescrite.

Comme dans SARRAH le cycle est divisé en 6 phases. La récolte a lieu à la fin du dernier stade. La durée thermique des différentes phases est prescrite comme une somme de degré.jours à atteindre. Pour cela un compteur de degré.jours est introduit. Le temps thermique, pour un jour j après le début du cycle, est donné par :

$$GDD_j = \sum_{i=S}^j (\min(T_{opt}, T_i) - T_b)$$

où S est la date de début de cycle, T_{opt} est la température (journalière) au-dessus de laquelle davantage de chaleur n'accélère plus le développement de la plante (30°C), T_b la température en-dessous de laquelle le développement cesse (11°C) ; T_i est la température moyenne du jour i .

Les phases 1 à 3 correspondent à des phases végétatives, la phase 4 correspond au stade floral, la phase 5 au remplissage des grains, et la phase 6 à la sénescence. Chaque jour dans les phases 1 à 4, la biomasse totale est partitionnée entre racines, tiges et feuilles selon les règles allométriques suivantes (Sama et al. 2001) :

$$BM_{abg} = BM_{tot} * (a * BM_{tot} + b)$$

$$BM_{leaf} = BM_{abg} * (a' * BM_{abg} + b')$$

$$BM_{root} = BM_{tot} - BM_{abg}$$

$$BM_{stem} = BM_{abg} - BM_{leaf}$$

où BM_{tot} , BM_{abg} , BM_{leaf} , BM_{root} , BM_{stem} sont respectivement les biomasses totales, aériennes, foliaires, racinaires, et des tiges (en gC/m^2). a , a' , b , b' , sont des paramètres empiriques, valant respectivement $4.44 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{gC}$, $-2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{gC}$, 0.5 et 0.63 (ces valeurs sont issues du modèle SARRAH).

Le compartiment réserve est supprimé, aucune biomasse ne lui est allouée. Aucune biomasse n'est allouée non plus aux grains pendant ces premières phases.

La biomasse produite durant la phase 4 détermine un « puits en grain », c'est-à-dire, un rendement potentiel, étant donné le développement de la plante, qui pourra être atteint en cas de conditions optimales. De la sorte, tout stress climatique pendant cette période réduit le rendement potentiel de la plante.

$$PotY = K * (BM_{e4} - BM_{i4}) + C$$

où BM_{e4} et BM_{i4} sont respectivement les biomasses à la fin et au début de la phase 4, et $PotY$ est le rendement potentiel. K et C sont des paramètres, valant respectivement 0.35 et 45 gC/m^2 (ces valeurs sont issues du modèle SARRAH).

Le « puits en grain » est rempli durant la phase 5 : la biomasse produite est prioritairement allouée au compartiment « fruits » d'ORCHIDEE, qu'on considère comme le compartiment qui porte le rendement. Chaque jour une part de ce puits est remplie, avec une modulation par le stress hydrique. Pour un jour en phase 5 :

$$DayY_i = PotY * \left(\frac{(T_i - T_b)}{GDD5} \right) * Wl$$

Et:

$$BMfruit_i = BMfruit_{i-1} + DayY_i$$

où $DayY_i$ est la biomasse allouée aux grains au jour i , T_i est la température moyenne du jour i et $GDD5$ la somme de degré.jour définissant la durée de la phase 5. Le rendement final du modèle est la biomasse du compartiment « fruit » à la fin de la phase 5. Wl est un facteur de stress hydrique : dans SARRAH, il correspond à $Tr/TrPot$ (transpiration réelle/transpiration potentielle, cette dernière dépendant du développement de la plante et de l'ETP). Cependant ORCHIDEE ne calcule pas de transpiration potentielle. Pour rester au plus près des formalismes de SARRAH à ce niveau, on calcule dans ORCHIDEE, pour Wl , le rapport $Ev/EvPot$ (évaporation réelle / évaporation potentielle), qui peut être considéré assez proche de $Tr/TrPot$ en fin de cycle étant donné que l'évaporation du sol devient proportionnellement moins importante du fait du développement du couvert végétal.

De la sorte, si aucun stress hydrique ne survient en phase 5, et si l'assimilation de carbone est suffisante, le rendement final atteint le rendement potentiel. Le remplissage des grains induit aussi la sénescence des feuilles si la biomasse requise quotidiennement est supérieure à l'assimilation : la biomasse manquante est alors prise dans les feuilles et dans les tiges. Toutefois la moitié de cette biomasse est perdue durant ce processus de translocation, pour rendre compte de son coût énergétique. Si l'assimilation reste supérieure à la demande en grain, la biomasse excédentaire est allouée vers les tiges : la croissance foliaire cesse en phase 5. Ce schéma détaillé d'élaboration du rendement permet d'obtenir au final des Indices de Récolte (IR, rapport du rendement à la biomasse totale de la plante) variables en fonction des conditions, au lieu de prescrire une valeur fixe d'IR à la biomasse totale de la plante.

Pour l'instant, aucune représentation explicite du stress azoté, dans ORCHIDEE comme dans SARRAH, n'est incluse : il n'y a pas de limitation explicite en nutriments.

La phase 6 correspond simplement à de la sénescence : la plante se dessèche, jusqu'à la récolte. Dans la présente version, toute la biomasse est redirigée vers la litière lors de la récolte. Pour tenir compte de la spécificité des cultures à ce niveau-là (et rendre compte de l'impact que cela peut avoir sur le cycle du carbone), une paramétrisation devrait être développée pour modéliser le retour différé du carbone contenu dans les grains vers l'atmosphère (compte tenu de la consommation humaine) ; néanmoins, l'objectif dans cette thèse n'étant pas de s'orienter vers des études couplées climat-carbone, cette simplification est sans conséquence ici.

2.2.2 SLA et LAI

La paramétrisation du SLA (en m^2/gC), la variable qui convertit la biomasse foliaire en LAI ($LAI = BMleaf * SLA$), fait intervenir le taux de croissance des feuilles, et des paramètres fixes censés représenter des maxima et minima génétiques (Penning de Vries et al. 1989) :

$$SLA_j = \min(SLA_{max}, \max(SLA_{min}, Z_j))$$

$$\text{avec } Z_j = SLA_{j-1} - A * (SLA_{j-1} - SLA_{min}) * \left(\frac{BMleaf - DayBMleaf}{BMleaf} \right) + SLA_{max} * \left(\frac{DayBMleaf}{BMleaf} \right)$$

où DayBMleaf est l'incrément journalier de biomasse foliaire. Les valeurs de SLA minimale ou maximale sont $1.44e-01$ et $4.44e-02 \text{ m}^2/\text{gC}$. A vaut ici 0.2.

Cette paramétrisation dynamique, au lieu d'un paramètre constant, permet de mieux rendre compte de l'évolution du SLA et du LAI avec l'âge des feuilles : à même biomasse, le LAI est plus élevé pour des feuilles jeunes (plus fines) que pour des feuilles âgées (plus épaisses). La figure 1.5 montre qu'on parvient, en incluant la paramétrisation ci-dessus, à bien représenter dans ORCHIDEE une dynamique de SLA similaire à celle simulée par SARRAH.

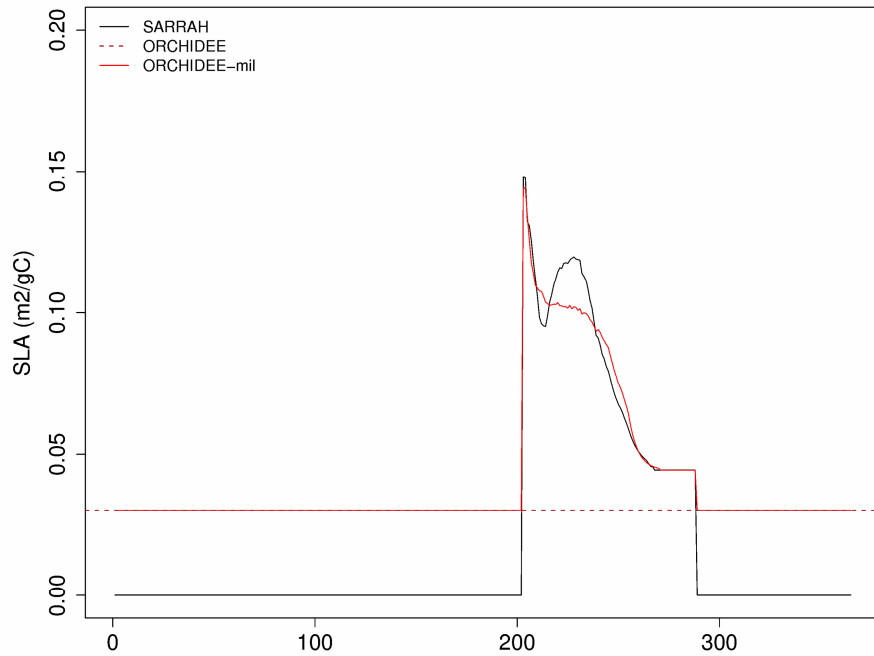


Fig.1.5 : SLA simulé par SARRAH, ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil, sur Bambey en 1997. Par défaut, dans ORCHIDEE-mil, le SLA en dehors du cycle de végétation reste constant aux valeurs initiales du paramètre SLA dans ORCHIDEE ($0.03 \text{ m}^2/\text{gC}$) : la biomasse foliaire étant de toutes les façons nulle à cette période, cela est sans conséquences sur la simulation.

2.2.3 Capacités photosynthétiques.

La représentation de la photosynthèse selon Collatz et al. (1992) dans ORCHIDEE (pour les plantes en C4) n'est pas modifiée. En effet, cette formulation et celle de SARRAH (selon une approche de Monteith) fournissent au final des valeurs de GPP similaires (fig.1.6); cependant, la formulation de Collatz permet, de par le couplage qu'elle simule entre photosynthèse et conductance stomatique, de rendre compte directement de l'effet éventuel de concentrations atmosphériques en CO_2 plus élevées, ce que ne permet pas, telle quelle, l'approche utilisée par SARRAH.

Cependant, on est amené à modifier légèrement le taux d'assimilation photosynthétique maximum (V_{cmax} , taux maximal de carboxylation de la Rubisco) : sa nouvelle valeur est abaissée à $80 \text{ micromol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$, semblable aux herbacées naturelles, au lieu de 100 dans la

version pseudo-cultures d'ORCHIDEE, où la valeur avait été augmentée pour rendre compte de la productivité accrue des agrosystèmes cultivés de façon intensive dans les régions tempérées; et surtout, une décroissance de V_{cmax} est prescrite dans les phases 5 et 6, respectivement de 100 à 70% et de 70 à 40%. Cette paramétrisation veut refléter celle présente dans SARRAH, où cette évolution s'applique au coefficient de conversion du rayonnement en biomasse. Une telle décroissance est censée rendre compte de la baisse des capacités photosynthétiques avec l'âge des feuilles. Une telle relation était déjà présente dans la version standard d'ORCHIDEE à travers une paramétrisation de l'âge des feuilles. Néanmoins le fait d'avoir, dans le code, introduit les règles d'allocation décrite ci-dessus a rendu ce calcul de l'âge des feuilles peu fiable ; pour rester le plus proche possible des formalismes de SARRAH, la dynamique du V_{cmax} a donc été prescrite explicitement, sur un mode semblable à celui de l'efficacité de conversion dans SARRAH.

2.2.4 Respiration et sénescence.

ORCHIDEE et SARRAH ne représentent pas la sénescence de la même façon. Dans SARRAH, la respiration correspond uniquement à une respiration de maintenance, dépendant de la biomasse totale de la plante et de la température (Penning de Vries et al. 1989). A la fin du cycle, la respiration est globalement plus importante que la GPP – d'autant plus que les capacités photosynthétiques de la plante s'amenuisent, voir ci-dessus - ce qui entraîne une NPP négative. Autrement dit, il y a une période de sénescence en fin de cycle où la NPP négative entraîne une perte de biomasse (voir fig.1.4b).

Dans ORCHIDEE, la respiration est au contraire essentiellement représentée comme une respiration de croissance, qui est calculée comme une taxe constante appliquée à la biomasse allouable (dépendant de la GPP). La respiration de maintenance, dépendant de la biomasse totale et de la température (selon Ruimy et al. 1996) est bien plus faible que cette respiration de croissance (pour les plantes en C4). Ainsi, la respiration totale (la somme des respirations de maintenance et de croissance) tend à rester plus longtemps inférieure à la GPP, de sorte que la NPP est moins négative. La sénescence de la plante, c'est-à-dire la perte de biomasse, dépend des conditions climatiques (température, humidité).

Etant donné que l'on calcule ici une date de début de cycle (semis) basée sur la pluie, et que la durée du cycle est prescrite (en degrés.jours), il n'est pas pertinent de conserver une paramétrisation de la sénescence pilotée par le climat : le timing des différentes phases du cycle végétal dans le modèle n'est pas relié aux conditions climatiques (à la part la dépendance générale de la durée du cycle à la température). En conséquence, la représentation de la respiration dans ORCHIDEE est modifiée de façon à ressembler à celle de SARRAH (fig.1.6) : la respiration de croissance est supprimée, et la respiration de maintenance est recalibrée (sans changer les formalismes mais en jouant sur les paramètres) pour être similaire à celle de SARRAH. On a donc désormais un schéma de sénescence/perte de biomasse similaire entre les deux modèles.

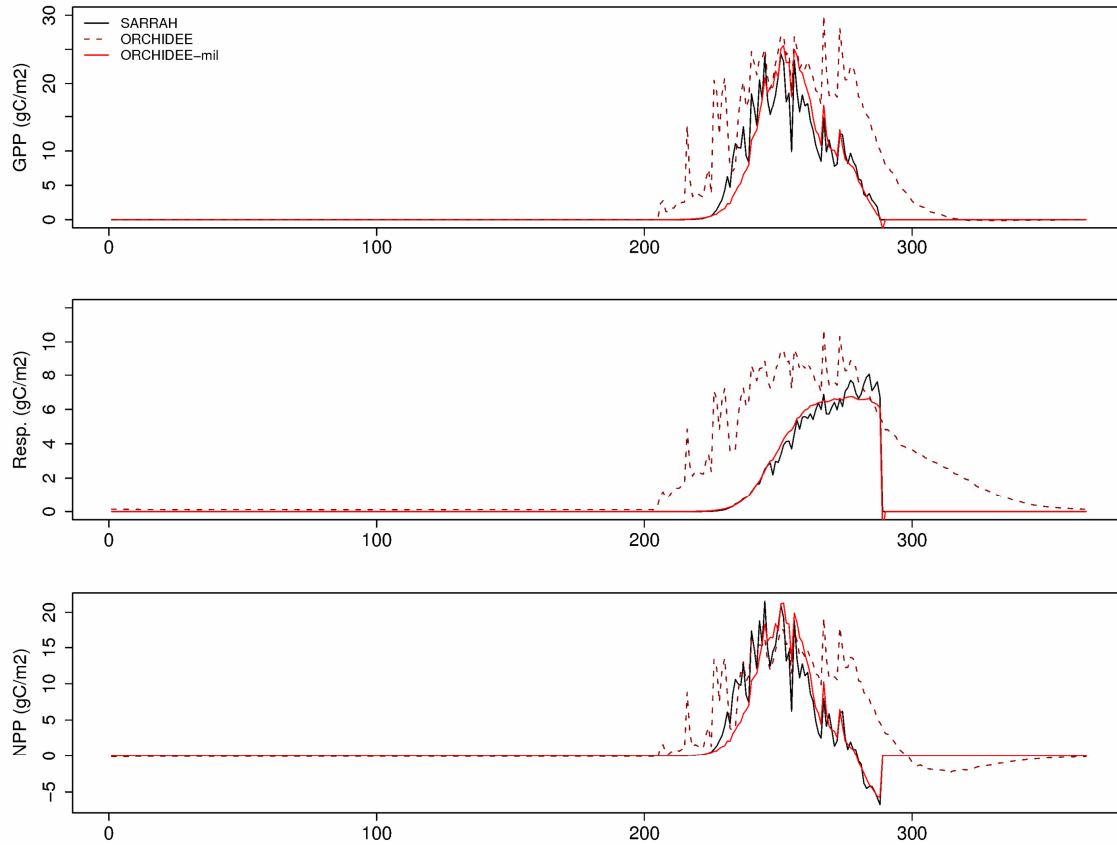


Fig.1.6 : GPP (haut), respiration totale (milieu) et NPP (bas) simulés par SARRAH, ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil, sur le site de Bambey en 1997

2.3 Simulation d'ORCHIDEE-mil sur le site de Bambey

La nouvelle version des cultures en C4 dans ORCHIDEE résultant de ces modifications, qu'on appellera ORCHIDEE-mil, est calibrée pour correspondre aux simulations de SARRAH sur le site de Bambey pour l'année 1997 (en considérant, rappelons-le, SARRAH comme un proxy des observations). La figure 1.7 montre que les deux modèles sont très proches (la date de semis est toujours prescrite dans les 2 cas).

La figure 1.8 montre la même comparaison pour l'année 1996, une année n'ayant pas servi à calibrer ORCHIDEE-mil.

On peut constater que les deux modèles restent largement en accord. Les différences résultent principalement de différences de paramétrisations concernant l'eau du sol et le stress hydrique. Ainsi, on constate qu'ORCHIDEE-mil sous-estime la réponse à une séquence sèche autour du jour 260 (en phase 5): le modèle simule un excès de biomasse, qui est alors alloué vers les tiges. Toutefois les erreurs restent relativement modestes, et au vu des deux années 1996 et 1997, il semble qu'ORCHIDEE-mil simule correctement le mil lorsqu'on le compare à SARRAH : il capture bien le cycle de végétation, à la fois en phasage et en amplitude (quantité de biomasse), ainsi que l'« architecture » de la plante (distribution de la biomasse de la plante dans les différents organes). Il est néanmoins évident que cette comparaison reste assez limitée, en nombre d'années et/ou de sites, comme en termes de processus. La section suivante s'attache donc à présenter d'autres éléments de comparaison sur site entre ORCHIDEE-mil et des observations sur le mil en Afrique de l'Ouest.

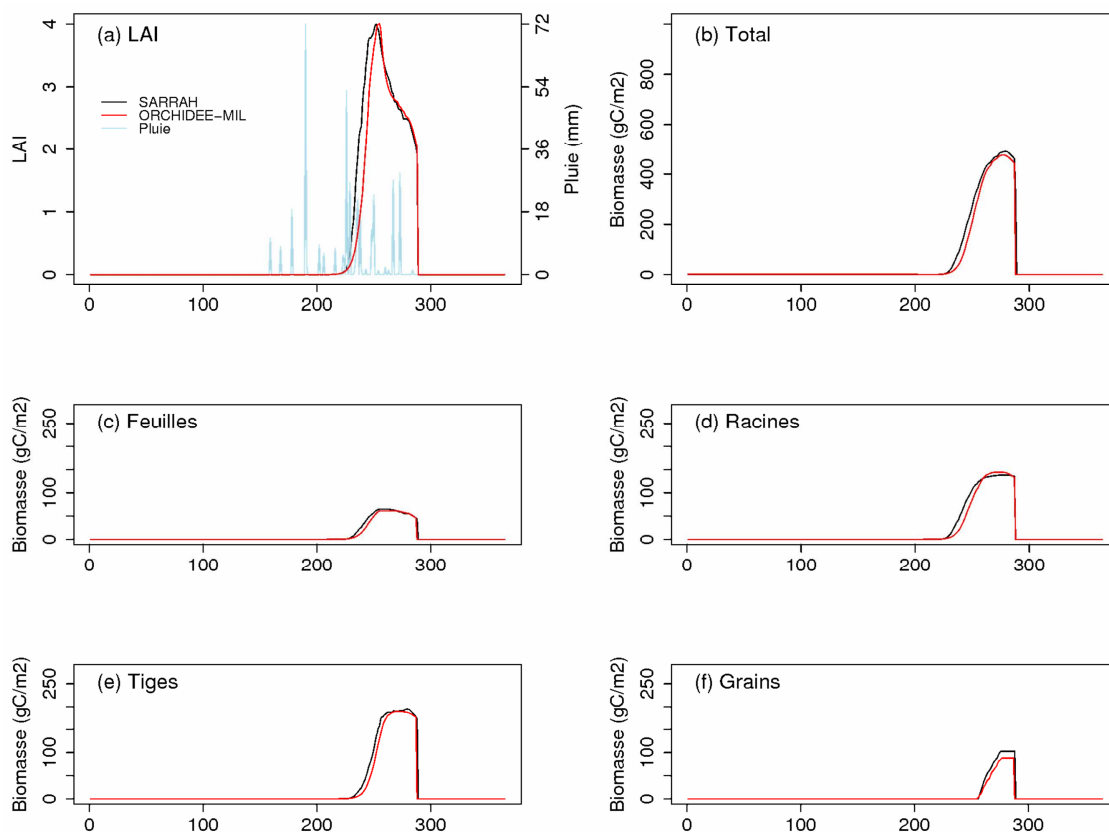


Fig.1.7 : Idem fig1.4, mais avec la version ORCHIDEE-mil.

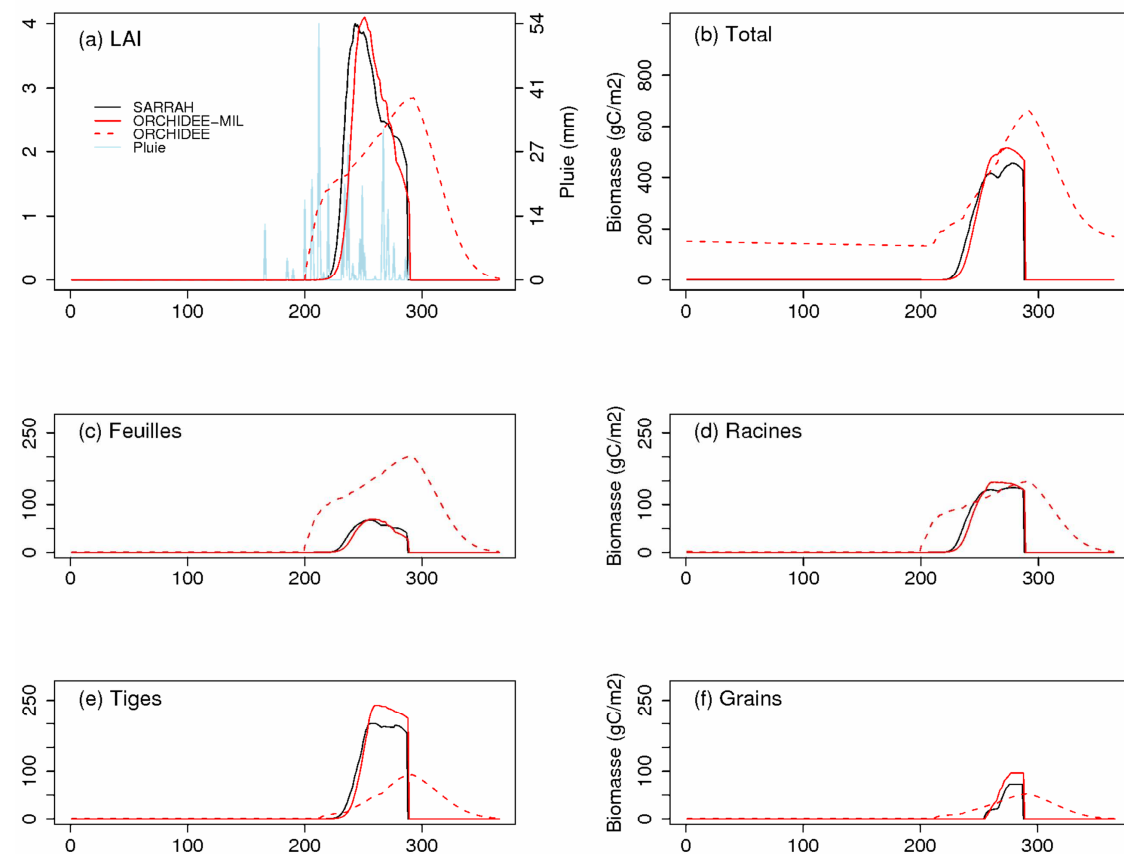


Fig.1.8 : Idem fig1.4, mais pour 1996 (la version standard d'ORCHIDEE est représentée en pointillés, pour indication)

3. Comparaison aux données du site de Wankama

Cette section présente une comparaison d'ORCHIDEE-mil aux données mesurées sur le site sahélien de Wankama, au Niger. Les mesures sur le site de Wankama sont réalisées par l'équipe de Bernard Cappelaere dans l'unité Hydrosociétés à Montpellier (composée notamment de Nicolas Boulain et David Ramier). L'utilisation de ces données dans le cadre de cette thèse est le fruit d'une collaboration entre cette équipe et le LSCE/LOCEAN, collaboration qui s'est déroulée dans le cadre du projet AMMA.

3.1 Le site de Wankama

Le site de Wankama proprement dit fait partie du bassin versant du même nom, au Niger, à 60km à l'Est de Niamey. Il fait partie de l'observatoire AMMA-Niger, un des trois sites de méso-échelle du projet AMMA installés le long d'un transect latitudinal recouvrant le gradient éco-climatique ouest-africain. La figure 1.9 résume l'emplacement et la disposition du site. Wankama est à un site semi-aride : la pluviométrie annuelle moyenne sur 1990-2006 y est de 479 mm, avec une saison des pluies courte entre juin et septembre. L'environnement y est typique du Sahel cultivé : près de 60% du bassin correspond à des champs de mil, plus de 20% sont des jachères (buissons, herbacées annuelles), les arbres sont isolés ou en petits groupes. Le sol est principalement sableux.

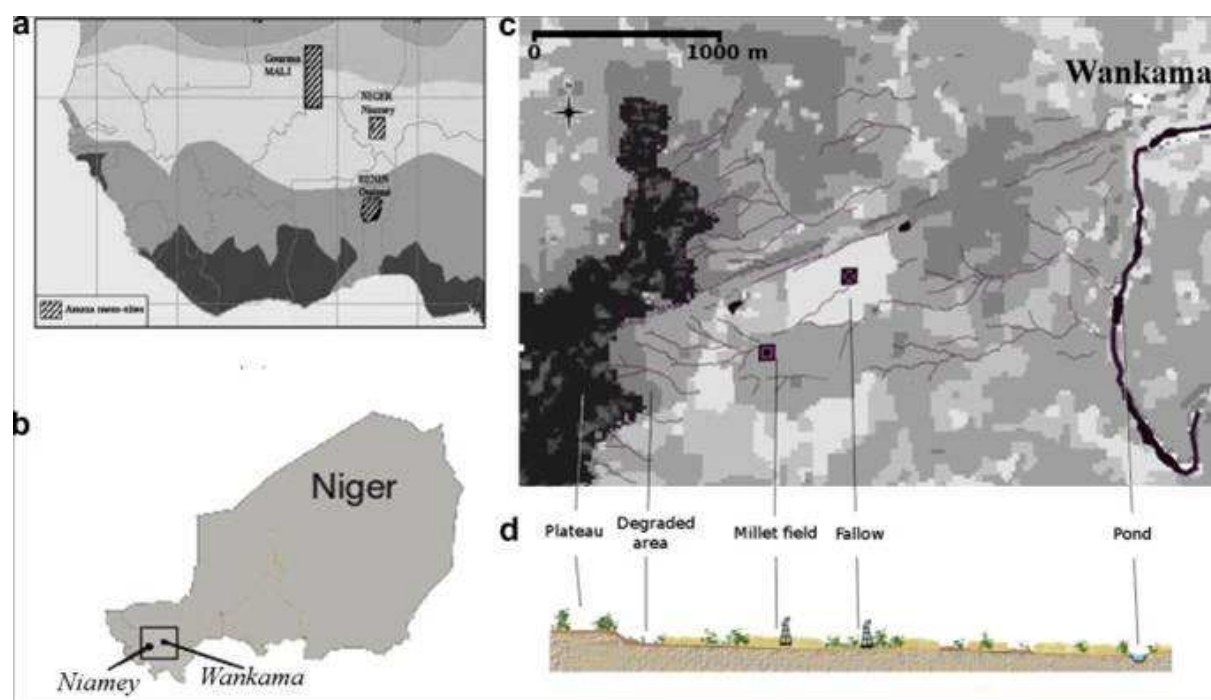


Fig.1.9 : bassin versant de Wankama sur le méso-site AMMA-Niger. Localisation du méso-site (rectangles) en : (a) Afrique de l'Ouest; (b) République du Niger; (c) Cartes du bassin versant de Wankama avec emplacement des tours de flux (carrés); et (d) Toposequence du bassin versant. Tiré de Ramier et al. (2009).

Deux tours de mesure de flux par eddy-covariance ont été installées sur ce site en juin 2005 : l'une sur un champ de mil, l'autre sur une jachère (de 5 ans), deux sites distants d'environ 500m. Les flux de carbone, les flux de chaleur sensible, latente et dans le sol, ainsi que les composantes du bilan radiatif (grandes et courtes longueurs d'ondes) et les profils de température et d'humidité du sol, sont mesurés sur chaque site. Ils peuvent donc être

comparés pour deux couverts différents - naturel et cultivé - soumis exactement au même climat. Les deux sites font également l'objet d'un monitoring de la végétation, à travers des mesures de biomasses aériennes, ainsi que de mesures météorologiques complètes. L'analyse des données mesurées sur deux années (2005 et 2006) et les deux sites, en relation avec les données météorologiques, est présentée dans Ramier et al. (2009) pour les aspects liés aux flux d'énergie, et dans Boulain et al. (2009) pour l'analyse des données de végétation et de flux de carbone.

Ce site constitue donc une opportunité unique de comparer les simulations d'ORCHIDEE à des mesures sur site reflétant l'ensemble des interactions surface-atmosphère, et ce pour deux types de couvert sahéliens - naturel et cultivé - subissant les mêmes conditions climatiques. En particulier, il s'agit à notre connaissance du seul site instrumental pour une culture de mil en milieu tropical. On présentera tout d'abord, dans les sections suivantes, les résultats sur le site de mil, en comparant les simulations d'ORCHIDEE-mil aux observations ; on effectuera également la comparaison avec les simulations issues de la version standard d'ORCHIDEE (pseudo-cultures, i.e. herbacées naturelles), afin d'illustrer dans quelle mesure la nouvelle version améliore la comparaison aux observations.

Une comparaison sur le site de végétation naturelle (jachère) a également été effectuée, avec une version d'ORCHIDEE modifiée par Pierre Brender (en thèse au LSCE) : cette version, de façon assez parallèle aux travaux réalisés au cours de cette thèse, vise à améliorer la représentation des écosystèmes naturels de type savane en zone tropicale. En comparant les simulations de ces deux versions sur chacun des sites, on pourra donc évaluer la capacité d'ORCHIDEE à représenter correctement les différences d'interactions surface/atmosphère entre couvert naturel et couvert cultivé en milieu sahélien.

3.2 Simulations

Bien que les mesures à Wankama aient lieu en continu depuis 2005, à l'époque des travaux présentés ici seules trois années (2005, 2006, 2007) étaient disponibles pour les mesures de biomasses, et deux années pour les flux (2005 et 2006) : la comparaison des flux surface-atmosphère ne pourra donc porter que sur ces 2 années. Qui plus est, les mesures n'ayant véritablement démarré qu'en juin 2005 (le 16/06), le début de l'année 2005 n'est pas disponible dans les données : cela ne constitue pas un problème majeur au niveau de l'analyse des données, étant donné que la période d'intérêt pour l'analyse du développement de la végétation et des interactions surface-atmosphère est celle de la saison des pluies, qui commence à peu près en juin – mais au niveau des simulations avec ORCHIDEE, il est impératif de forcer le modèle avec un jeu de données météorologiques annuel complet, ce qui impose de compléter artificiellement les données climatiques du début d'année. On utilise alors simplement, pour cela, le début d'année 2006 pour toutes les variables autres que la pluie ; pour les précipitations on utilise les données issues d'un autre pluviomètre du bassin versant déjà en place avant 2005 : on fait l'hypothèse qu'en saison sèche (avant juin), les données météorologiques autres que la pluie (température, rayonnement...) n'auront pas d'influence sur le développement de la végétation pendant la saison des pluies suivante. En revanche, il est essentiel d'avoir dans le forçage les « vraies » pluies du début 2005 : cette année-là quelques pluies ont lieu en tout début de saison, avant mi-juin, ce qui peut avoir un impact sur l'humidité du sol, le développement de la végétation et les échanges surface-atmosphère au cours des mois suivants.

Le protocole expérimental est le même pour les simulations avec ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil : pour chacune des deux années, un spin-up de 15 ans est effectué (itération sur la même année) afin d'initialiser le contenu en eau du sol (cf section 2.2) ; une initialisation du carbone du sol est également effectuée sur plusieurs milliers d'années pour

atteindre un équilibre des stocks de carbone du sol dans le modèle. On peut noter que la végétation réelle, sur le site de mil, n'est, elle, pas véritablement à l'équilibre, étant donné que cette parcelle est une jachère convertie en mil l'année précédant l'installation des dispositifs de mesure (de même, les stocks de carbone de la jachère ne sont pas non plus à l'équilibre, étant donné que la jachère est âgée de seulement 5 ans). Néanmoins il n'est pas possible de simuler l'historique précis de chaque site au cours des dernières décennies dans ce type de comparaison.

Les valeurs d'albédo du sol, ainsi que de la végétation, sont également calibrées pour correspondre autant que possible aux mesures du site, en particulier les valeurs de l'albédo en saison sèche, qui correspondent au sol nu (voir figure 1.17 plus bas). En effet ORCHIDEE lit sur une carte une couleur de sol moyenne au point de grille correspondant aux coordonnées du site, et utilise alors comme albédo du sol pour ce site des valeurs prescrites en fonction de cette couleur. Ces valeurs ici ne correspondent pas à ce qui est mesuré sur le site : comparer les termes du bilan d'énergie de surface dans ces conditions ne serait alors pas pertinent.

De même, les fractions des différents PFTs sur le site sont prescrites. Les champs de mil dans une région sahélienne telle que celle de Wankama correspondent à une agriculture essentiellement extensive, et sont relativement clairsemés : ici la fraction effectivement occupée par le mil ne dépasse pas 30% (voir figure 1.10). Cette faible densité de culture résulte d'un compromis de l'agriculteur entre la recherche de rendement, les capacités de la parcelle, en eau et en nutriment, à supporter le développement d'une importante végétation, et le travail à apporter à la culture. Une fraction correspondante de sol nu (70%) est donc prescrite dans le modèle. Boulain et al. (2009, et *pers. comm.*) indiquent qu'en plus du mil, des petits buissons (*Guiera Senegalensis* Lam) peuvent se développer sur le site avant la culture, en début de saison de pluie, ainsi que des herbacées si le semis n'a pas lieu aux toutes premières pluies. De telles adventices sont ensuite largement éliminées avant semis, ou contenues par l'agriculteur au cours de la saison des pluies (par sarclage), mais peuvent se développer à nouveau après la récolte si les conditions sont encore favorables. Comme notre modèle ne rend pas compte de cette gestion humaine de la végétation naturelle (et qu'il est en outre peu probable que les PFTs naturels d'ORCHIDEE reproduisent avec assez de précision le développement d'herbes ou de buissons sur ce site en particulier), seul du mil (PFT agricole en C4) est simulé ici : hors de la saison de croissance, le sol, dans le modèle, reste nu.

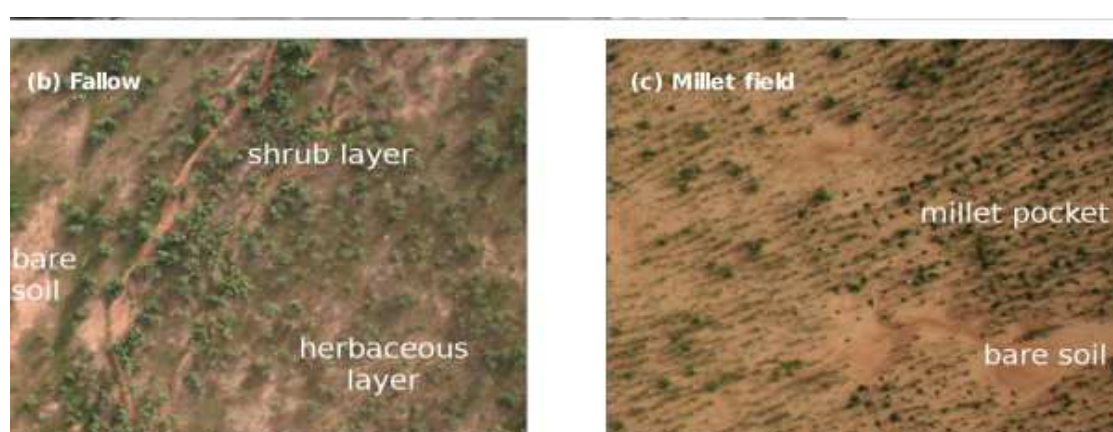


Fig.1.10 : Vues aériennes des sites « jachère » (b) et « mil » (c) de Wankama. Tiré de Boulain et al. (2009). Notez la faible densité de végétation sur le site de mil.

3.3 Comparaison des biomasses et flux de carbone

a. Saisons des pluies

Les trois saisons des pluies (2005 à 2007) montrent de larges différences (fig.1.11) - ce qui témoigne de la grande variabilité interannuelle des pluies en zone sahélienne. En 2005, les précipitations sont moins abondantes (495 mm) qu'en 2006 (572 mm), mais mieux réparties. En particulier, la saison des pluies 2006 démarre avec un délai d'un mois par rapport à 2005, et se termine plus précocement : les pluies sont donc concentrées en une saison bien plus courte (115 jours contre 165 jours – Ramier et al. 2009). La saison 2007 cumule une faible quantité de pluies (431 mm) avec une fin de saison précoce.

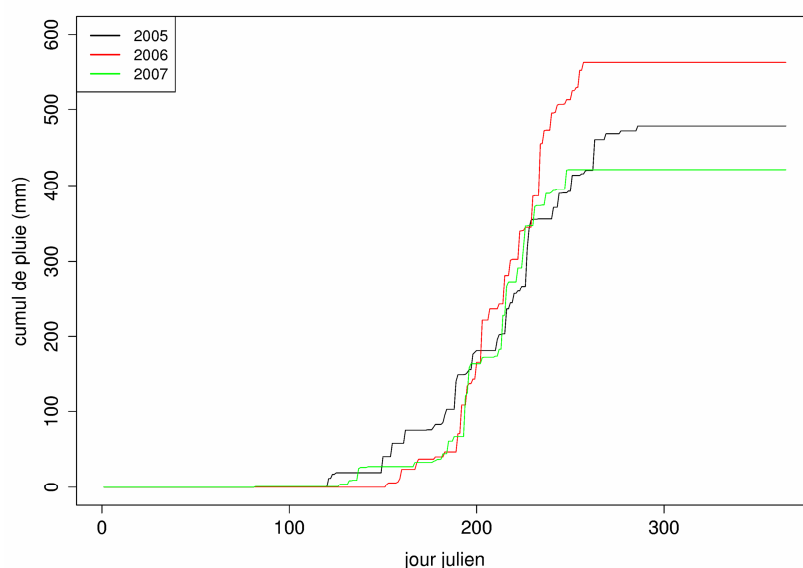


Fig.1.11 : Pluie cumulée mesurée à Wankama en 2005, 2006, 2007.

b. Biomasses

Dans un premier temps, on laisse ORCHIDEE-mil calculer sa propre date de semis, selon les pluies (cf section 2.2 de ce chapitre). La figure 1.12 compare les biomasses aériennes mesurées et simulées : on constate tout d'abord que les biomasses simulées par le modèle sont dans les bons ordres de grandeur, et que dans tous les cas, les biomasses simulées avec ORCHIDEE-mil sont beaucoup plus réalistes que celles simulées avec la version standard d'ORCHIDEE.

On constate qu'en laissant ORCHIDEE-mil calculer le semis, on parvient à bien représenter la dynamique de biomasse en 2005, bien qu'avec un léger retard; en revanche le modèle simule un cycle trop précoce pour 2006 et 2007. En 2006 en particulier, les observations montrent que le mil ne démarre et ne se développe que très tardivement (avec plusieurs semis successifs en juillet – Boulain et al. 2009) : même en tenant compte du démarrage tardif de la saison de pluies cette année-là, le début du cycle est inhabituellement tardif. Au final le cycle est significativement décalé par rapport à la saison des pluies (fig.1.12, milieu): rien ne pousse avant début août, et le cycle se prolonge bien après la fin de la saison des pluies. Les variétés de mil utilisées dans cette région étant à cycle fixe, et non photopériodiques (autrement dit, la durée du cycle est indépendante de la date de début cycle), le maximum de biomasse n'est atteint que mi-octobre, bien après la fin des pluies, contre début septembre pour 2005. Bien qu'il simule quand même un décalage du cycle d'une vingtaine de jours par rapport à 2005, le modèle ne parvient pas à reproduire cette dynamique de biomasse très atypique de 2006.

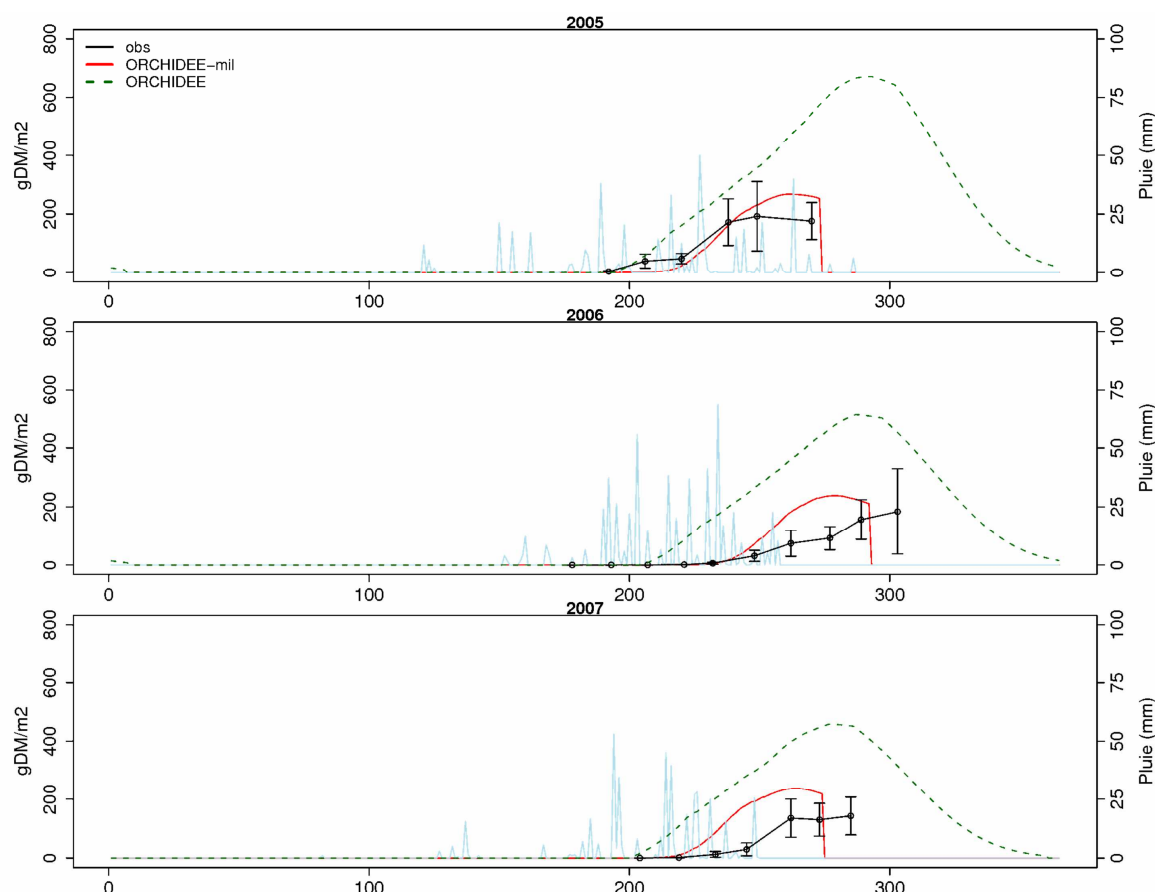


Fig.1.12 : Biomasses aériennes (gDM/m^2 = gramme de matière sèche par m^2) mesurées (noir) et simulées par ORCHIDEE-mil (rouge) et par ORCHIDEE (vert en tirets), pour 2005, 2006 et 2007. Les barres verticales noires correspondent à l'écart-type des mesures de biomasse sur les différentes placettes échantillonnées dans le champ. Pour plus de détails sur le protocole des mesures de végétation, on pourra consulter Boulain et al. (2009). En bleu sont représentées les pluies.

La paramétrisation du semis ne constituant qu'une partie du modèle, il convient de tester également le comportement d'ORCHIDEE-mil lorsque la date de début de cycle est correctement représentée.

Bien que les données de Boulain et al. (2009) ne reportent pas explicitement les dates de semis, on peut les inférer d'après les premiers jours où les mesures de biomasse sont non-nulles. Lorsqu'on prescrit au modèle ces dates de début de cycle, on constate (fig.1.13) que l'adéquation entre les cycles observés et simulés par ORCHIDEE-mil s'améliore significativement. En particulier, la biomasse simulée en 2006 et 2007 est davantage en adéquation avec les données. En supposant que l'arrêt des mesures de biomasses correspond, à quelques jours près, à la récolte, la longueur de cycle est également correctement représentée. Les années 2005 et 2006 semblent indiquer, malgré l'incertitude sur les observations, que le modèle sous-estime légèrement le développement du mil en début de cycle, et le surestime par la suite, ce qui indiquerait que la dynamique d'allocation du modèle ne rend pas bien compte du développement du mil en conditions paysannes (ou du moins du développement des variétés utilisées à Wankama). Néanmoins ces différences restent faibles, et modifier les formalismes initiaux de SARRAH est, en tout état de cause, au-delà des objectifs de cette étude sur site. En amplitude et en phasage (en prescrivant, certes, la date de début de cycle), on peut donc avancer qu'ORCHIDEE-mil capture correctement, au premier ordre, le signal de végétation sur la parcelle de mil.

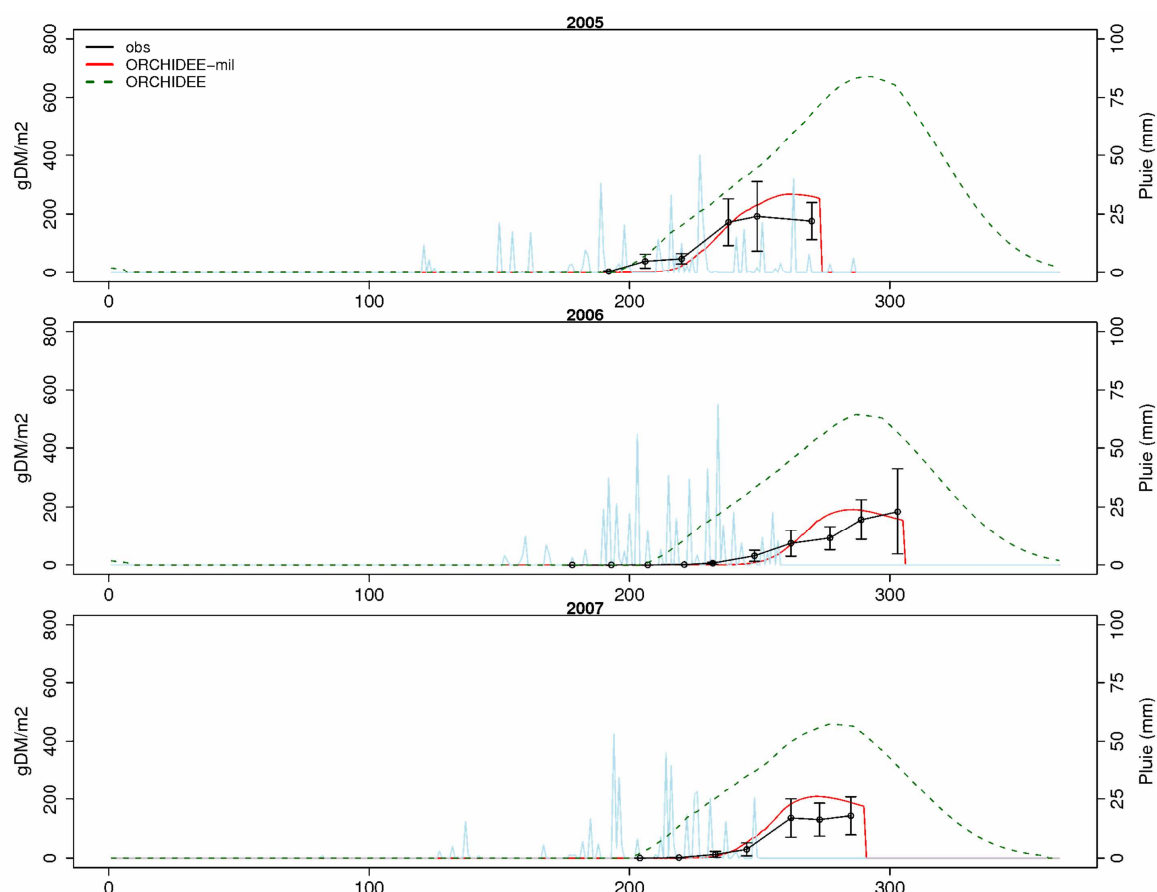


Fig.1.13 : Biomasses aériennes (gDM/m^2 = gramme de matière sèche par m^2) mesurées (noir) et simulées par ORCHIDEE-mil avec des dates de semis prescrites (rouge) et par ORCHIDEE (vert en tirets), pour 2005, 2006 et 2007. Les barres verticales noires correspondent à l'écart-type des mesures de biomasse sur les différentes placettes échantillonnées dans le champ. En bleu sont représentées les pluies, à titre indicatif.

En termes de variabilité interannuelle, on peut voir sur la figure 1.14 qu'ORCHIDEE-mil reproduit qualitativement la hiérarchie des biomasses mesurées pour les différentes années : en tenant compte de la forte incertitude sur le fin de la saison 2006, on retrouve dans le modèle la hiérarchie observée $2005 > 2007 > 2006$. La comparaison avec les cumuls pluviométriques (fig.1.11) permet de constater que cette hiérarchie n'est pas celle des cumuls de pluie : la répartition intrasaisonnière des pluies joue en effet un rôle important pour l'amplitude du développement de la végétation. Ceci est particulièrement vrai pour la saison 2006, très pluvieuse, mais très courte, qui a généré une faible récolte. La figure 1.14 montre que le modèle est capable de prendre en compte ces effets intrasaisonniers. Les données de végétation du site n'incluent pas les rendements de mil obtenus pour les différentes années : on ne peut donc pas directement comparer le rendement simulé par ORCHIDEE aux observations ; néanmoins, si on fait l'hypothèse que les rendements de la parcelle reflètent la quantité de biomasse mesurée, la figure 1.14 suggère que le modèle capture, au premier ordre, la variabilité des rendements. On peut également constater que cette hiérarchie est moins bien reproduite par la version standard d'ORCHIDEE (fig.1.14).

La comparaison d'ORCHIDEE-mil aux observations de biomasse sur les trois années est donc globalement satisfaisante lorsque les dates de semis sont imposées au modèle ; on constate en particulier qu'on a significativement amélioré la simulation par rapport à la version standard d'ORCHIDEE. Améliorer la paramétrisation du modèle gérant le semis afin que, ici, elle permette de directement calculer le début du cycle avec précision, serait certes souhaitable, mais en pratique cela reste limité par la capacité d'un modèle à rendre compte de façon simple

de l'ensemble des critères (climatiques, mais aussi de gestion des parcelles, de calendrier,...) intervenant dans cette décision de l'agriculteur. Qui plus est, cette paramétrisation doit rester suffisamment générique pour rester valable lorsque le modèle sera appliqué à plus grande échelle.

Il est important de noter que l'amplitude du cycle de végétation n'est correctement simulée que si l'on prend en compte la faible densité du champ de mil sur Wankama en prescrivant au modèle une fraction importante de sol nu (70% ici). Dans le cas contraire, la biomasse (et le rendement) serait fortement surestimée : on retrouverait typiquement les valeurs obtenues sur le site de Bambey. Cette faible densité reflète le faible niveau d'intensification de la conduite culturale de la parcelle dans un environnement pédo-climatique adverse.

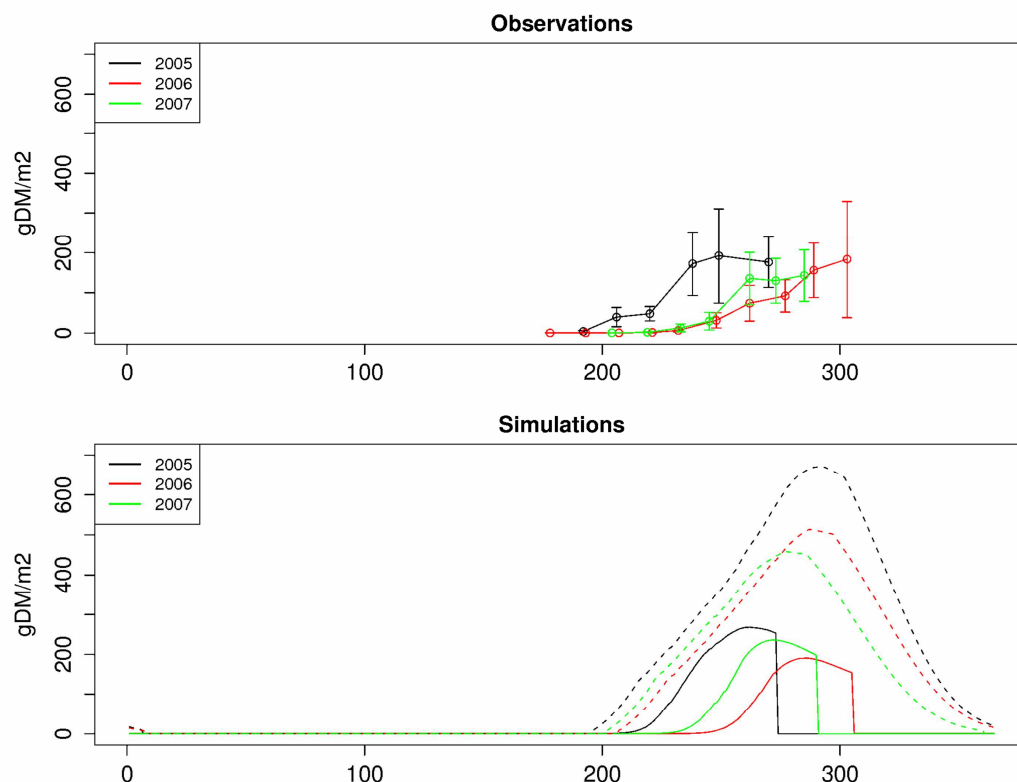


Fig.1.14 : Biomasses aériennes de mil observées (haut) et simulées (bas) par ORCHIDEE-mil (traits pleins) et ORCHIDEE (tirets) à Wankama en 2005, 2006 et 2007.

c. Flux de carbone

La figure 1.15 compare les simulations et les observations de biomasse, GPP, respiration et NEE (Net Ecosystem Exchange) pour 2005 et 2006. Les mesures de respiration correspondent aux flux mesurés la nuit (absence de photosynthèse), les données de NEE aux flux diurnes (respiration et assimilation), les données de GPP à la différence entre les deux. Pour plus de détails sur le traitement des données de flux, on pourra se rapporter à Boulain et al. (2009).

On peut constater tout d'abord que les ordres de grandeur de la respiration, de la GPP et de la NEE simulés par ORCHIDEE-mil sont en bonne adéquation avec les observations. L'accord avec les données est meilleur, en particulier, qu'avec ORCHIDEE : ORCHIDEE dans sa version standard simule une GPP trop importante, et une respiration trop importante (ces erreurs se compensent au niveau de la NEE).

En revanche, la saisonnalité des flux et la dynamique respective des différents flux ne sont pas correctement représentées par ORCHIDEE-mil.

En 2006, on retrouve, en fin de cycle, le comportement d'ORCHIDEE-mil décrit dans la section 2.2.4 : la GPP décroît rapidement, la respiration (proportionnelle à la biomasse notamment) devient supérieure à l'assimilation, et donc la NEE devient négative – d'où une perte de biomasse. Les observations ne semblent pas correspondre à ce scénario : l'assimilation ne décroît pas aussi vite, et la respiration se réduit davantage en fin de cycle, de sorte que la NEE reste positive – et les observations de biomasse, dans la limite des incertitudes, ne semblent pas indiquer de diminution.

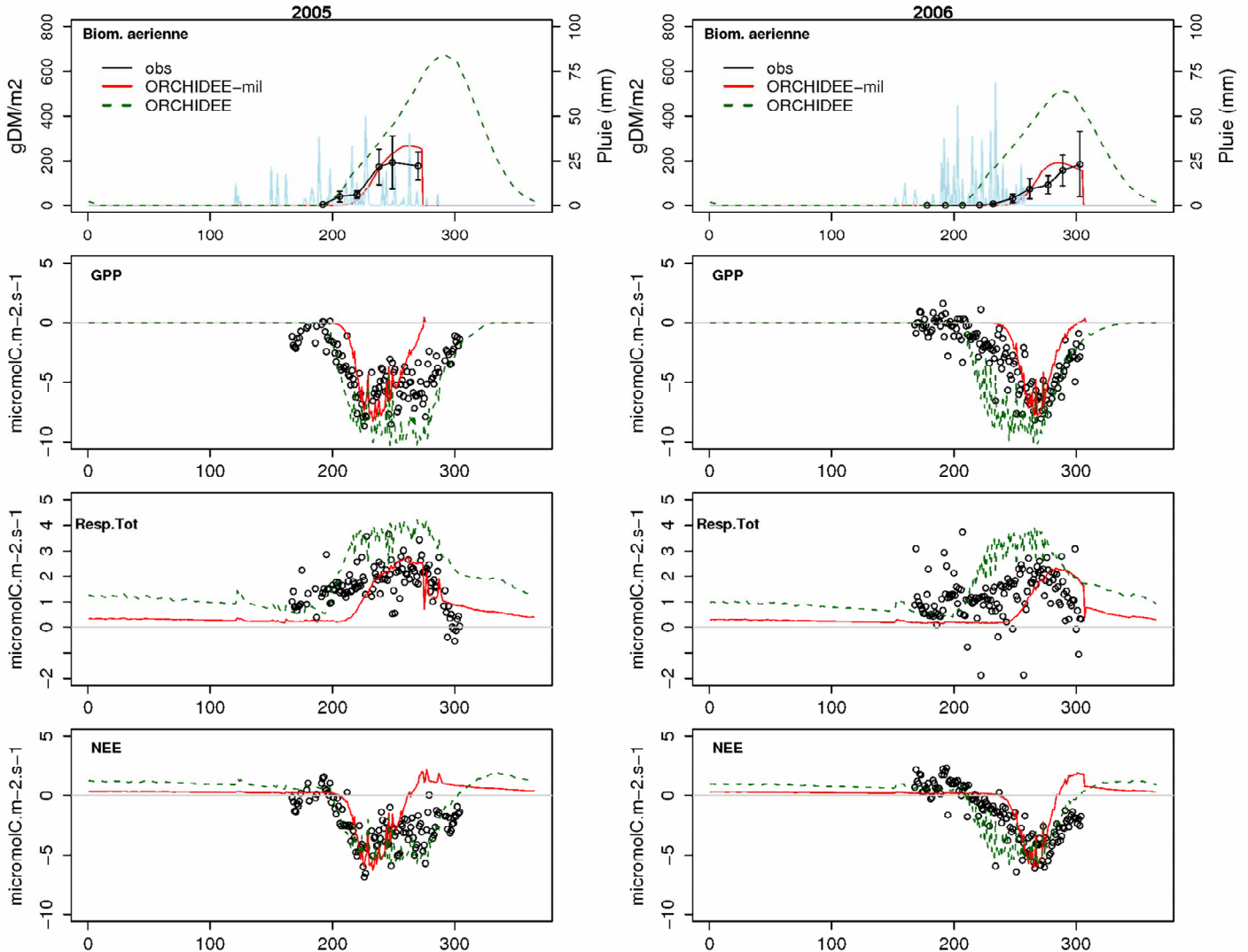


Fig.1.15 : Biomasse aérienne (gDM/m^2 = gramme de matière sèche par m^2) et flux de carbone mesurés (noirs), simulés par ORCHIDEE-mil (rouge) et ORCHIDEE (vert, tirets). Les valeurs observées (ronds creux) sont des valeurs journalières. Les valeurs négatives correspondent à des flux nets de l'atmosphère vers la végétation (pertes atmosphériques, gains pour la végétation).

Cette même différence observations/modèle peut se constater pour l'année 2005 ; cependant la saison 2005 montre aussi que d'autres facteurs contribuent à la différence entre observations et simulations en fin de cycle. En effet, en 2005, l'assimilation simulée par ORCHIDEE-mil tombe à 0 à la récolte ; or on peut constater que l'assimilation brute (GPP) et la respiration se poursuivent après la récolte du mil (en faisant, encore une fois, l'hypothèse que la récolte réelle a lieu peu de temps après le dernier point de mesure de biomasse). On observe également une poursuite de la transpiration du couvert (voir section suivante). Cette activité ne provient pas des plants de mil : en effet, comme il a été dit plus haut, la parcelle de

mil après récolte n'est pas constituée uniquement du sol nu, mais comporte également souvent une reprise des adventices herbacées ou de la végétation arbustive, que l'agriculteur a pu laisser se développer en fin de cycle (voir fig.1.16). Dans ces conditions, il est possible d'interpréter cette poursuite d'activité de la végétation sur le champ de mil comme le résultat de ce « relais » pris par la végétation naturelle en fin de saison (N.Boulain, *pers. comm.*).

En 2005, une autre différence entre les mesures et les simulations se situe en début de cycle: l'activité photosynthétique et la respiration semblent démarrer plus tôt que ne le simule ORCHIDEE-mil (mais elles se compensent au niveau de la NEE). Il est possible que ce décalage provienne du léger retard dans le développement de la biomasse simulée par le modèle (fig.1.15 panel du haut) ; mais il est aussi possible d'y voir là encore un effet de la végétation autre que le mil, qui n'est pas pris en compte dans le modèle.

De façon cohérente avec cette dernière hypothèse, on constate que pour 2005, la saisonnalité des flux de carbone (GPP, respiration et NEE) simulés par ORCHIDEE, avec une végétation herbacée, sans récolte, est, au final, davantage en accord avec les données. En revanche, pour 2006, la version standard d'ORCHIDEE ne parvient pas à représenter le pic tardif de GPP et de NEE. Ce pic résultant de la phénologie particulière du mil (début tardif et cycle à durée déterminée), il est au contraire bien simulé par ORCHIDEE-mil. D'autre part, du fait des biais moyens en GPP et respiration, l'écart moyen sur la saison entre modèle et observations est plus faible avec ORCHIDEE-mil qu'avec ORCHIDEE (tab.1.3). Ces biais s'annulant au niveau de la NEE, celle-ci reste mieux simulée par ORCHIDEE (tab.1.3), mais cet accord résulte d'une compensation d'erreur.

Enfin, dans ORCHIDEE-mil, lors de la « récolte », l'ensemble de la biomasse est transférée à la litière : on peut voir sur la fig.1.15 la lente respiration de cette litière pendant le début de la saison sèche suivante. Même si les données s'arrêtent ici à la fin du cycle de végétation et ne permettent pas de le mettre clairement en évidence, cette paramétrisation, comme il a été dit plus haut (section 2.2.4), ne correspond pas à la réalité, dans la mesure où le mil fauché est exporté, et consommé tout au long de l'année (par l'homme pour les grains, par le bétail pour les pailles).



Fig.1.16 : Parcelle de mil de Wankama après récolte, le 11 novembre 2006. Notez les touffes vertes de Guiera Senegalensis, et les herbacées (photo : Nicolas Boulain).

RMSE	Année	GPP ($\mu\text{molC.m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Resp ($\mu\text{molC.m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	NEE ($\mu\text{molC.m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
ORCHIDEE	2005	1.98	1.14	1.11
	2006	2.21	1.20	1.36
ORCHIDEE-mil	2005	1.90	0.68	1.76
	2006	1.51	0.89	1.52

Tab.13 : RMSE (Root Mean Square Error) entre modèle et observations en 2005 et 2006, pour ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil, pour les flux de carbone. GPP (NEE) : assimilation brute (nette) ; Resp. : respiration totale.

3.4 Comparaison des flux d'énergie

L'exhaustivité des mesures réalisées sur le site de Wankama permet de comparer aux observations l'ensemble des termes du bilan d'énergie simulés par ORCHIDEE-mil : les flux de chaleur sensible et latente (H et LE), le flux de chaleur dans le sol G (qui est calculé dans ORCHIDEE comme la différence du rayonnement net et la somme de H et LE), les composantes du bilan radiatif. Les rayonnements incidents de courte et grande longueur d'onde étant imposés comme forçages, ils sont égaux dans les observations et les simulations (non montré).

L'albédo du couvert étant calibré, autant que possible, sur les observations (fig.1.17), le rayonnement de courte longueur d'onde ascendant (SWout) simulé par ORCHIDEE-mil est globalement en bon accord avec les mesures. Néanmoins sur la fin de la fin de la saison 2006, l'albédo simulé diffère des observations : la hausse d'albédo résultant de la récolte, dans le modèle, ne se retrouve pas dans les observations, où l'albédo diminue graduellement. L'albédo étant trop élevé, le SWout simulé est alors trop important (fig.1.17).

En fin d'année, le rayonnement de grande longueur d'onde ascendant (LWout) est également légèrement surestimé par ORCHIDEE-mil. En conséquence le rayonnement net R_n ($LW_{in} - LW_{out} + SW_{in} - SW_{out}$) est alors sous-estimé dans le modèle, avec des différences allant jusqu'à plus de 10W.m^{-2} fin 2006. En 2005 et pendant la saison des pluies 2006, cette différence est essentiellement due au LWout ; sur la saison sèche de fin 2006, s'ajoute un effet de surestimation de l'albédo (cf ci-dessus), donc de surestimation du SWout.

En termes de flux latent (i.e., d'évapotranspiration), on observe une bonne correspondance entre la dynamique et les valeurs simulées par ORCHIDEE-mil et les observations pendant le cœur de la saison des pluies (fig.1.18). La bonne correspondance en début de saison, en outre, lorsque la végétation n'est pas encore présente (début 2006 notamment, autour du jour 200), suggère que le modèle reproduit bien, indépendamment, la réponse de l'évaporation du sol à la pluie. En fin de saison, on retrouve la différence notée dans la section précédente : l'évaporation tombe à 0 après la fauche dans le modèle (il n'y a plus de plante pour évaporer), mais reste substantielle dans les mesures, où elle décline lentement au cours du début de saison sèche suivante. Cette dynamique suggère, comme il a été dit ci-dessus, qu'une végétation naturelle continue à être active sur le champ de mil, continuant à assimiler et à évaporer.

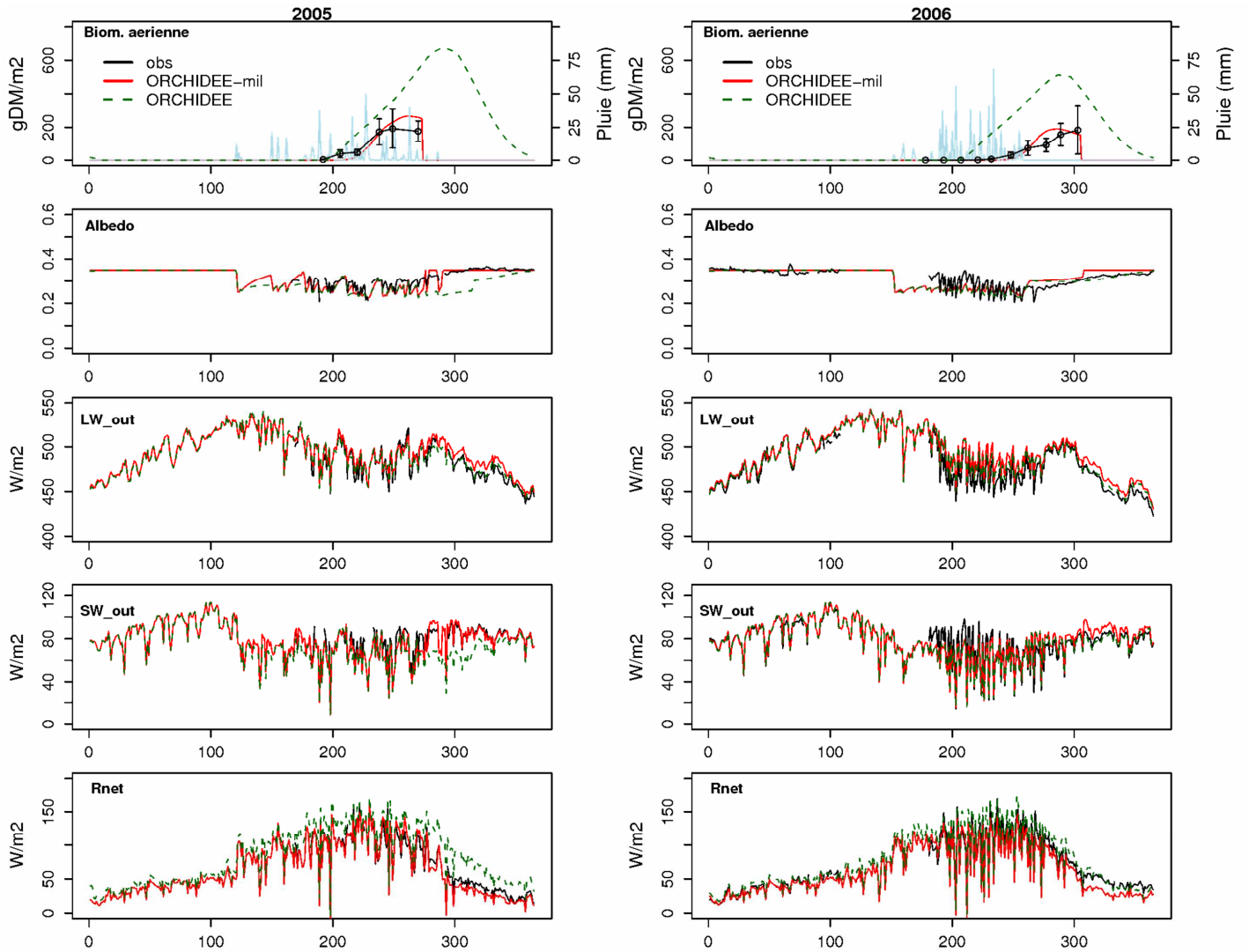


Fig.1.17: Biomasse aérienne (gDM/m^2 = gramme de matière sèche par m^2), albédo, rayonnement ascendant de grande (LW_{out}) et courte (SW_{out}) longueur d'onde, rayonnement net (Rnet), mesurés (« obs ») et simulés par ORCHIDEE-mil (rouge) et ORCHIDEE (vert, tirets), à Wankama en 2005 (gauche) et 2006 (droite). En bleu sont représentées les pluies sur le panel du haut. Le dispositif de mesure n'ayant été installé qu'à la mi-juin 2005, les 6 premiers mois de mesure manquent en 2005. On rappelle qu'alors les simulations ont été réalisées avec le forçage de début 2006, sauf pour la pluie, qui provient des mesures d'un autre pluviomètre du site et correspond donc réellement à la pluie de 2005. Les rayonnements ascendants simulés en début d'année en 2005 et 2006 sont donc très proches, jusqu'au moment où les pluies commencent à différer (jour 120 environ). Les mesures sont également manquantes en 2006 entre le jour 109 et 181.

Les variations simulées du flux de chaleur dans le sol G sont également en bon accord avec les observations. En revanche, la comparaison est moins bonne pour le flux sensible H : à première vue, les observations montrent que le modèle surestime H en saison des pluies, et le sous-estime en saison sèche. La représentation correcte du flux sensible H reste, de façon générale, une des faiblesses d'ORCHIDEE (Krinner et al. 2005) : ces erreurs ne sont donc, qualitativement, pas surprenantes – toutefois, l'ampleur des différences observées est problématique. C'est particulièrement le cas fin 2005 et début 2006, avec une sous-estimation d'un facteur 2 (~environ 25 W/m^2 contre 50 W/m^2). Toutefois, on peut s'interroger, pour cette période, sur la fermeture du bilan d'énergie dans les observations: le rayonnement net, somme des SW_{in} , SW_{out} , LW_{in} et LW_{out} , doit en effet a priori être égal à la somme des flux turbulents ($\text{LE} + \text{H}$) et du flux dans le sol (G). C'est le cas, par construction, dans ORCHIDEE-mil. Dès lors, du fait de la relativement bonne adéquation, en saison sèche, entre le

rayonnement net calculés d'après les flux radiatifs dans le modèle et dans les observations (fin 2005 et début 2006, voir fig.1.18), la forte différence de flux turbulents entre modèle et mesures (ces dernières étant très supérieures au premier) suggère que le bilan d'énergie n'est pas fermé dans les observations – pendant la saison sèche. On ne peut donc clairement remettre en cause la simulation d'ORCHIDEE-mil sur cette période. Sur la saison des pluies, en revanche, la surestimation de H par ORCHIDEE-mil incombe sans doute davantage aux erreurs du modèle – même si la différence qui en résulte sur la somme des flux simulés (H+LE+G) reste dans la fourchette d'erreur de la fermeture du bilan d'énergie dans les observations sur la saison des pluies (13%, Ramier et al. 2009). Qualitativement, le modèle reproduit bien la bascule entre le régime des flux de saison sèche (H dominant, LE faible) à celui de saison des pluies (LE dominant, H faible), particulièrement en 2006.

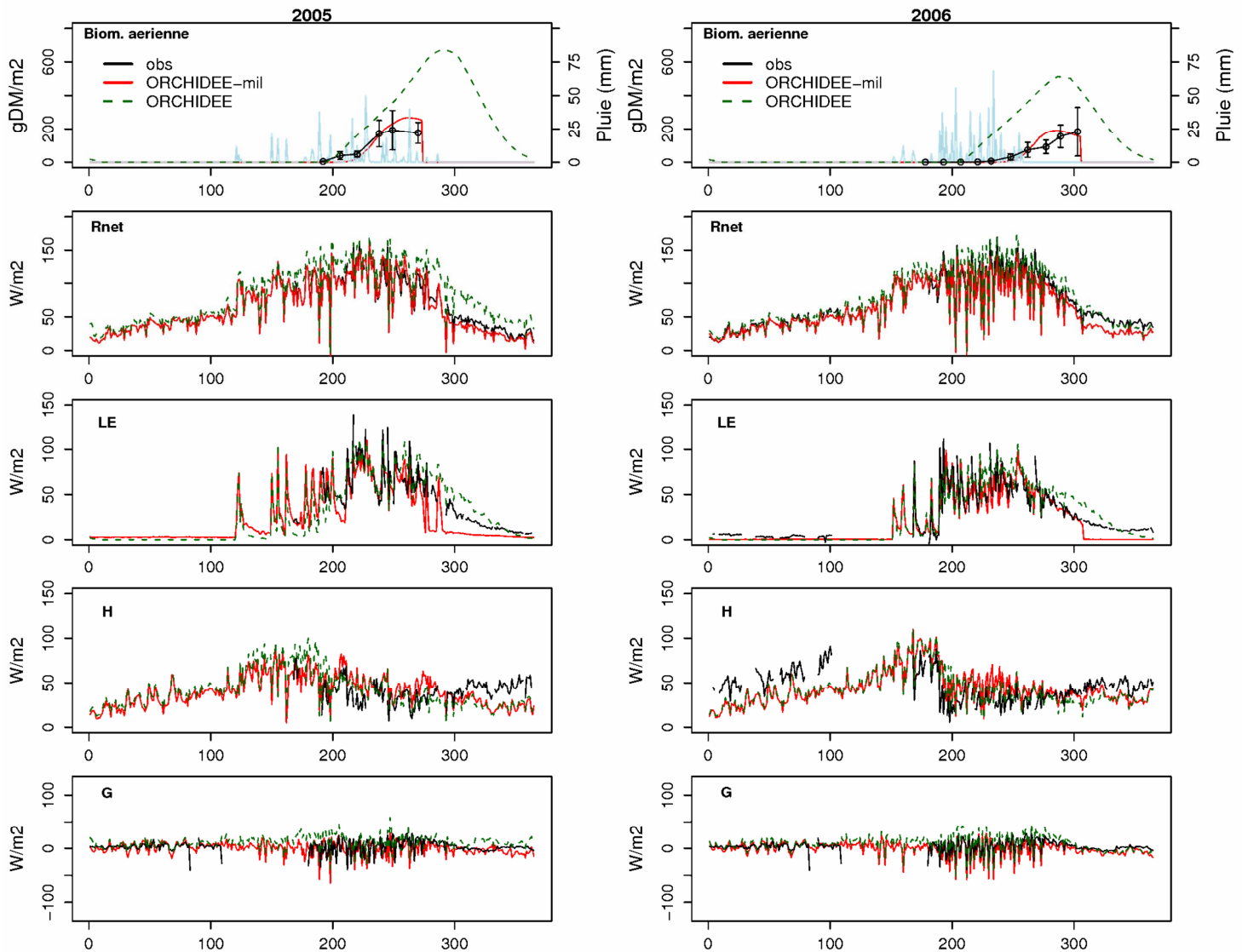


Fig.1.18 : Biomasse aérienne (gDM/m^2 = gramme de matière sèche par m^2) (haut), rayonnement net (Rnet), flux de chaleur latente (LE), sensible (H) et flux de chaleur dans le sol (G), mesurés (noir) et simulés par ORCHIDEE-mil (rouge) et ORCHIDEE (vert, tirets), à Wankama en 2005 (gauche) et 2006 (droite). En bleu sont représentées les pluies sur le panel du haut.

La comparaison de ces résultats avec les simulations issues de la version standard d'ORCHIDEE (en vert sur les figures précédentes) montre que l'adéquation avec les données de flux radiatifs et turbulents est généralement meilleure avec ORCHIDEE-mil, mais pas

systématiquement (tab.1.4). De façon cohérente avec la section précédente et les flux de carbone, la saisonnalité du flux de chaleur latente est presque mieux reproduite par ORCHIDEE qui simule des herbacées et ne représente pas de récolte (fig.1.18) ; toutefois l'évaporation simulée est alors trop importante. Les biais sur le flux de chaleur sensible H sont partagés par les deux versions : cela confirme la nature fondamentale, en termes de physique du modèle, de ce biais, qui n'est pas dû spécifiquement à la représentation de la végétation cultivée dans ORCHIDEE-mil.

RMSE	Année	Alb.	SWout (W.m ⁻²)	LWout (W.m ⁻²)	Rnet (W.m ⁻²)	LE (W.m ⁻²)	H (W.m ⁻²)	G (W.m ⁻²)
ORCHIDEE	2005	0.050	11.72	5.67	25.21	14.25	15.16	16.71
	2006	0.051	11.82	13.50	18.57	19.05	28.21	23.40
ORCHIDEE-mil	2005	0.024	5.63	7.69	8.25	15.25	15.24	10.73
	2006	0.052	12.11	18.10	20.29	16.63	29.35	23.18

Tab.1.4 : RMSE (Root Mean Square Error) entre modèle et observations en 2005 et 2006, pour ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil, pour l'albédo, les flux radiatifs, les flux de chaleur et les flux de carbone. LWout (SWout) : rayonnement ascendant de grande (courte) longueur d'onde ; Rnet : rayonnement net ; LE (H) : flux de chaleur latente (sensible) ; G : flux de chaleur dans le sol.

L'effet du changement de version entre ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil sur le bilan radiatif est complexe : de façon générale, le bilan radiatif reste mieux simulé en 2006 par ORCHIDEE, mais en 2005 est bien mieux représenté par ORCHIDEE-mil. En 2005, on constate une large sous-estimation de l'albédo dans ORCHIDEE, et donc des erreurs importantes sur le SWout et le rayonnement net (fig.1.18 et tab.1.4). Cette sous-estimation de l'albédo semble clairement due à la surestimation de la végétation (fig.1.18) ; cependant la végétation est également surestimée en 2006, sans impact, cette fois-ci, sur l'albédo.

En 2005 et 2006, le LWout reste également moins biaisé dans ORCHIDEE que dans ORCHIDEE-mil (tab.4), en particulier pour la fin de saison (fig.1.17). Cette différence de LWout simulé à cette période entre les deux modèles correspond à la présence de végétation dans ORCHIDEE et non dans ORCHIDEE-mil : cela suggère également qu'il est plus réaliste de simuler un couvert végétal en fin de saison.

Fondamentalement, la comparaison des flux d'énergie (radiatifs et turbulents) entre les deux modèles et les observations souligne donc la différence entre le champ virtuel simulé par ORCHIDEE-mil (une parcelle homogène, constitué uniquement de mil, puis de sol nu après la récolte) et le champ réel, qui comporte une végétation adventice (herbacées, buissons) pouvant faire l'objet d'une gestion par l'agriculteur pendant le cycle, et reprendre après le cycle. Dès lors, bien que la simulation des flux de carbone et d'énergie par ORCHIDEE-mil soit globalement réaliste, certains aspects fins de la saisonnalité des flux ne sont pas bien reproduits. De plus, l'amélioration de la simulation des flux surface/atmosphère, par rapport à

la simulation d'une végétation naturelle comme dans ORCHIDEE, n'est alors pas directement proportionnelle à l'amélioration de la simulation de la biomasse (section 3.3).

La comparaison aux données de flux révèle aussi un certain nombre de biais dans ORCHIDEE-mil. Par exemple la représentation de la dynamique des différents flux de CO₂ (GPP, respiration) ne semble pas correcte en fin de cycle. Cela mériterait d'être approfondi et éventuellement corrigé; toutefois, dans le cadre de cette thèse, il n'est pas envisagé, au-delà de cette étude sur site, d'utiliser directement ORCHIDEE-mil dans des études sur le cycle du carbone : on ne s'intéressera donc pas davantage ici à ces aspects. De même le calcul du flux de chaleur sensible paraît poser problème, du moins pendant la saison des pluies – mais ces erreurs ne semblent pas particulièrement liées aux paramétrisations agronomiques spécifiquement introduites dans le modèle : les erreurs sur le flux H constituent un biais général de la physique d'ORCHIDEE. L'amélioration de cette physique restant au-delà des objectifs de cette thèse, on ne cherchera pas ici explicitement à corriger ces biais.

3.5 Comparaison végétation naturelle/cultivée

Comme il a été dit plus haut, le site de Wankama, avec ses mesures sur un champ de mil et sur une jachère, offre l'opportunité unique de comparer les interactions surface/atmosphère sur végétation naturelle et cultivée en milieu sahélien. On a vu dans les sections précédentes qu'ORCHIDEE-mil simulait correctement la végétation sur le site cultivé. Dans cette section on se propose donc de comparer les simulations d'ORCHIDEE-mil sur le site de mil et celles d'ORCHIDEE-savannah (version développée dans sa thèse par Pierre Brender) sur le site de jachère. De la même manière qu'ORCHIDEE-mil reprend et modifie les formalismes d'ORCHIDEE pour le PFT « cultures en C4 », ORCHIDEE-savannah modifie les PFTs herbacés d'ORCHIDEE pour améliorer la simulation des écosystèmes herbacés tropicaux de type savane. Basées sur une calibration sur le site d'Agoufou au Mali, les modifications principales portent sur la phénologie et la photosynthèse des herbacées : par rapport à la version standard d'ORCHIDEE, le calcul du début de croissance est modifié, la sénescence est accélérée, et la capacité photosynthétique augmentée.

Les simulations avec ORCHIDEE-savannah sont réalisées selon le même protocole que celles avec ORCHIDEE-mil sur le site cultivé (cf. section 3.2). La principale différence entre les deux sites, du point de vue de la végétation, est que le couvert végétal est plus dense sur la parcelle (cf. fig.1.10). Les fractions de PFTs prescrites sont différentes : 8% de sol nu, 16% de buissons (*Guiera Senegalensis* Lam) représentés dans le modèle par le PFT « Tropical Broadleaf raingreen », et 74% d'herbacées (N.Boulain, *pers. comm.*) dont les deux tiers en C3 et un tiers en C4.

Il ne s'agit pas ici d'analyser en détail les simulations d'ORCHIDEE-savannah, de façon similaire aux sections précédentes: on se contentera d'en présenter les résultats. On peut voir sur les figures 1.19 et 1.19bis que cette version représente très correctement, pour la jachère en 2005 et 2006, l'amplitude et la saisonnalité du cycle d'albédo et du cycle flux de chaleur latente (les simulations pour le mil sont reportées sur ces figures à titre de comparaison et sont identiques à celles des figures 1.17 et 1.18). On retrouve dans ces simulations, encore une fois, le même biais qu'avec ORCHIDEE-mil pour le flux de chaleur sensible : par rapport aux observations, il est surestimé en saison des pluies, sous-estimé en saison sèche.

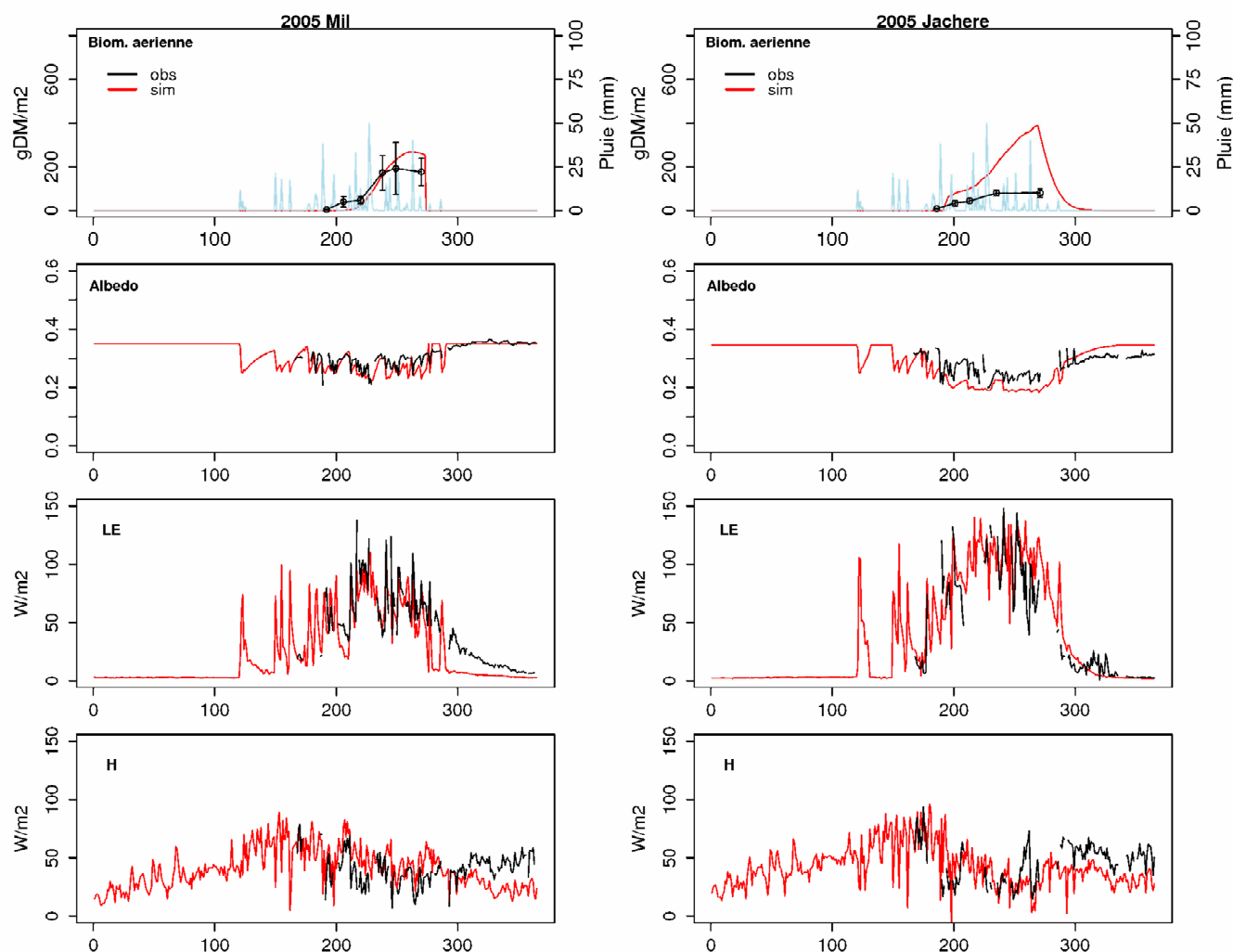


Fig.1.19 : Observations (noir) et simulations (rouge) sur le site de mil (à gauche) et de jachère (à droite), avec ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah respectivement, en 2005, pour, de haut en bas : biomasse aérienne (grammes de matière sèche par m^2), albédo, flux de chaleur latente (LE), flux de chaleur sensible (H). Les simulations pour le mil (ORCHIDEE-mil) sont représentées à titre de comparaison : ce sont les mêmes que sur les figures 1.17 et 1.18

En revanche, on constate une surestimation importante de la biomasse simulée par rapport aux observations. Ce biais est étonnant au regard des bonnes caractéristiques simulées pour les autres variables, en particulier pour les flux de carbone (fig.1.20 et 1.20bis) : l'ordre de grandeur de la GPP est correctement simulé, et la NEE est plutôt légèrement sous-estimée du fait de la surestimation de la respiration totale. Ce biais de biomasse reste à ce jour inexpliqué (P.Brender, *pers. com.*). Au-delà de ces biais moyens, la saisonnalité des flux de carbone est très bien représentée par ORCHIDEE-savannah.

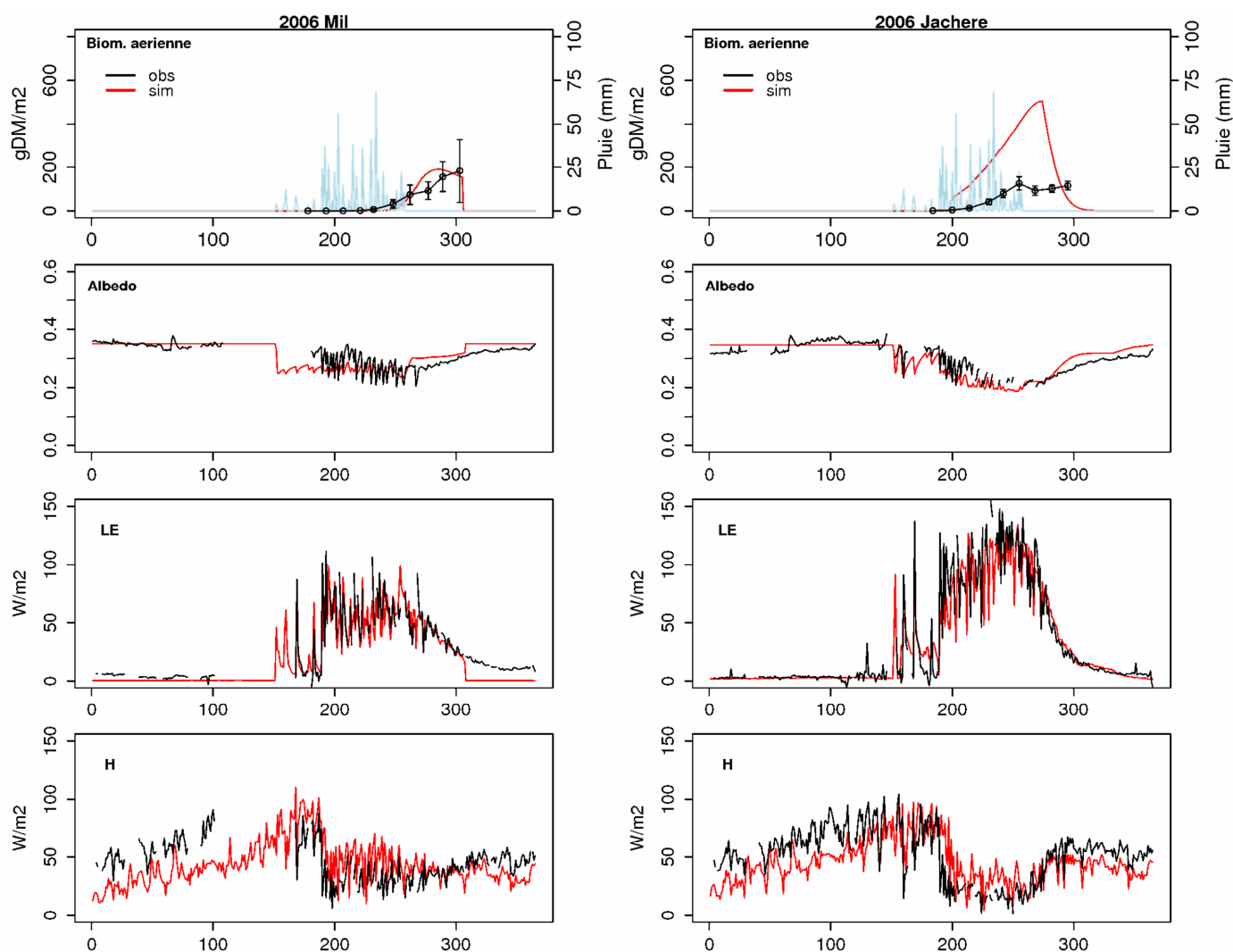


Fig.1.19bis : Observations (noir) et simulations (rouge) sur le site de mil (à gauche) et de jachère (à droite), avec ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah respectivement, en 2006, pour, de haut en bas : biomasse aérienne (grammes de matière sèche par m²), albédo, flux de chaleur latente (LE), flux de chaleur sensible (H). Les simulations pour le mil (ORCHIDEE-mil) sont représentées à titre de comparaison : ce sont les mêmes que sur les figures 1.17 et 1.18

La comparaison entre les deux sites (fig.1.21) montre que les deux versions d'ORCHIDEE utilisées ici (ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah) parviennent à reproduire certaines des différences observées importantes entre le site cultivé et le site naturel. C'est particulièrement le cas en 2006. On retrouve dans les simulations l'albédo plus faible sur le site de jachère que sur le site de mil. On retrouve également, pendant le cœur de la saison des pluies, les valeurs plus élevées d'assimilation brute (GPP) et nette (NEE) – de l'ordre de $6-7 \mu\text{molC.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pour la NEE - les valeurs plus élevées de flux de chaleur latente – de l'ordre de 50 W.m^{-2} - auxquelles correspondent des valeurs plus faibles de flux de chaleur sensible - de l'ordre de 10 W.m^{-2} .

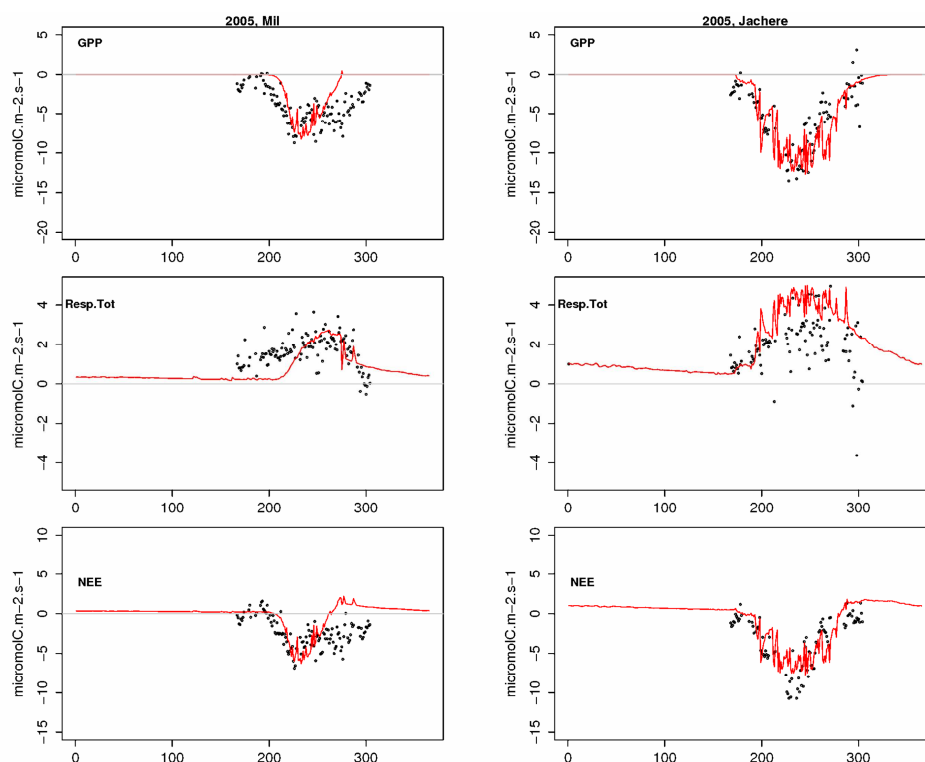


Fig.1.20 : Observations (noir) et simulations (rouge) sur le site de mil (à gauche) et de jachère (à droite), avec ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah respectivement, en 2005, pour les flux de carbone (GPP, respiration totale et NEE). Les valeurs négatives correspondent des flux nets de l'atmosphère vers la végétation (pertes atmosphériques, gains pour la végétation).

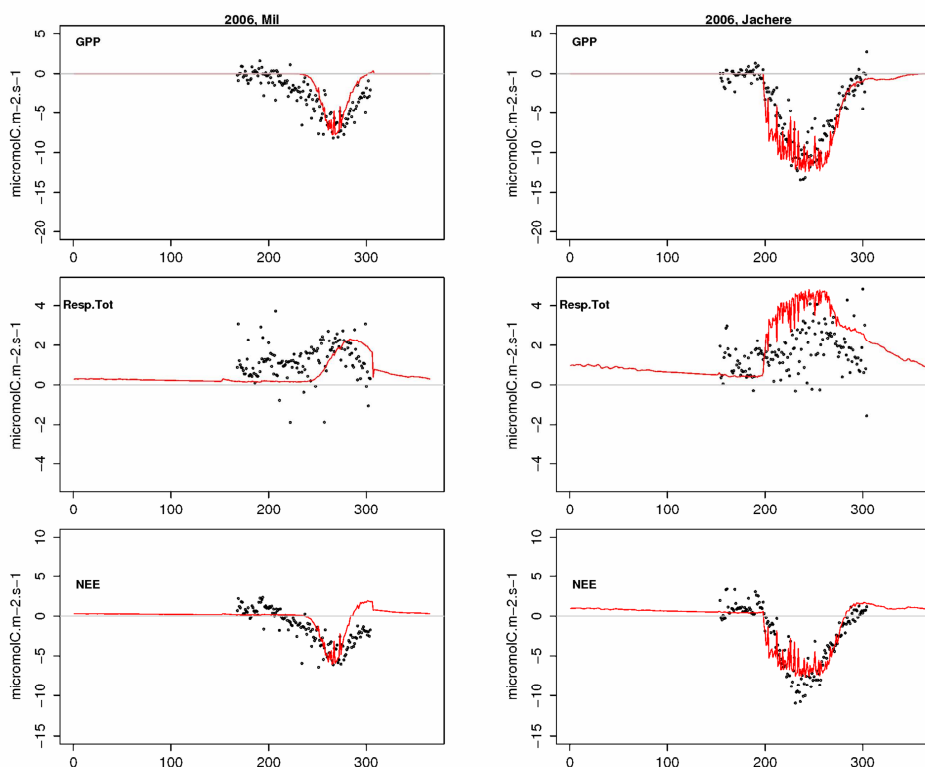


Fig.1.20bis : Observations (noir) et simulations (rouge) sur le site de mil (à gauche) et de jachère (à droite), avec ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah respectivement, en 2006, pour les flux de carbone (GPP, respiration totale et NEE). Les valeurs négatives correspondent des flux nets de l'atmosphère vers la végétation (pertes atmosphériques, gains pour la végétation).

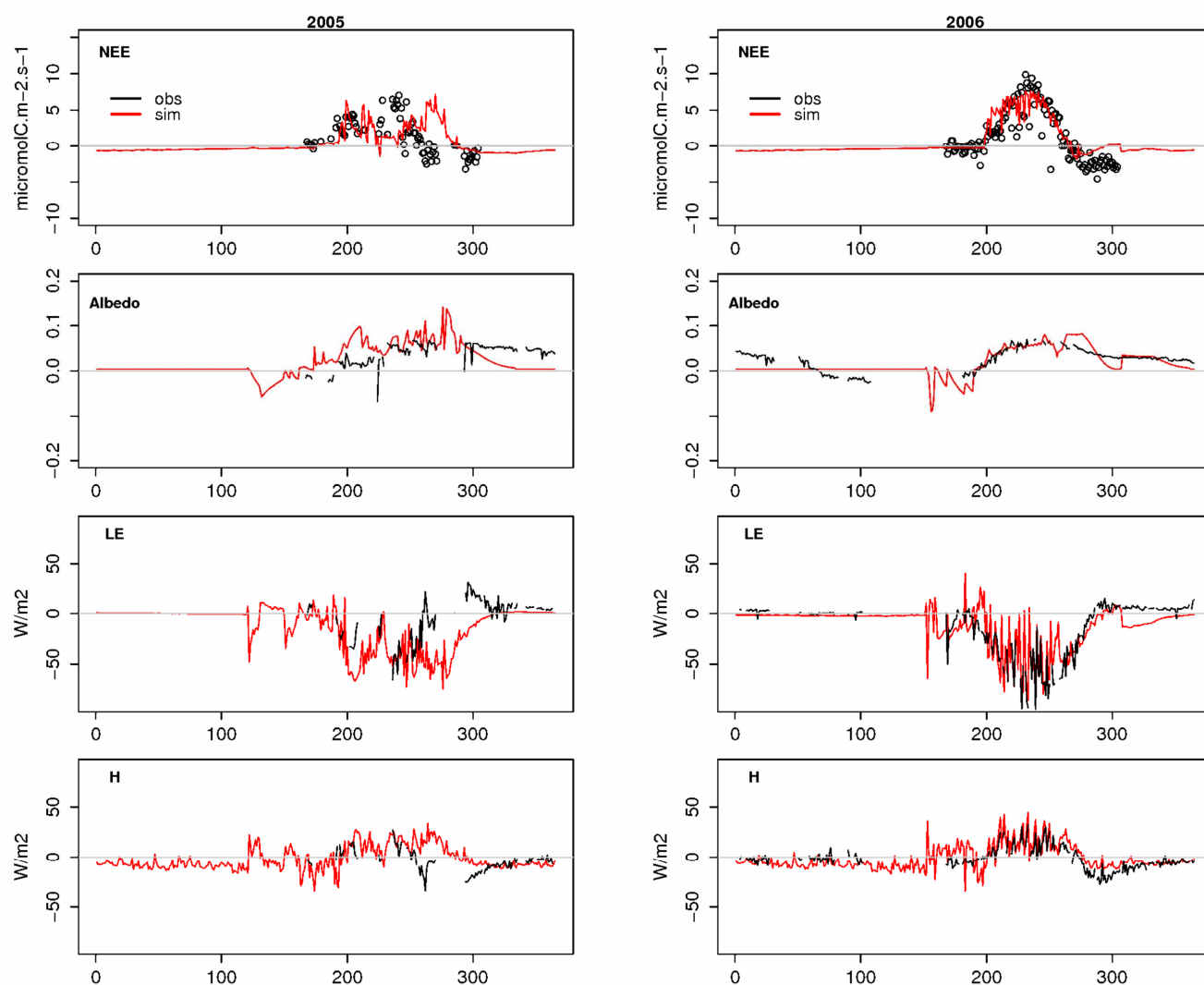


Fig.1.21 : Différences observées (noir) et simulées (rouge) en 2005 (à gauche) et 2006 (à droite) entre le site de mil et le site de jachère (mil – jachère), pour, de haut en bas : l'assimilation nette (NEE), l'albédo, le flux de chaleur latente (LE) et le flux de chaleur sensible (H). La simulation sur le site de mil est réalisée avec ORCHIDEE-mil, celle sur le site de jachère avec ORCHIDEE-savannah. Les valeurs négatives de NEE correspondent à des flux nets de l'atmosphère vers la végétation (pertes atmosphériques, gains pour la végétation) : une différence positive entre mil et jachère correspond donc à une assimilation nette plus faible sur le mil.

Ces différences moyennes entre jachère et mil résultent davantage de la différence de densité de végétation entre les deux sites que des différences de phénologie et physiologie entre les deux types de végétation: la jachère étant plus dense, l'assimilation nette, et donc la transpiration, y sont plus importantes. Comme l'albédo est plus élevé sur le site de mil (du fait de la plus faible densité de couvert végétal), le rayonnement net (l'énergie disponible en surface) y est plus faible, de sorte que la hausse de flux de chaleur sensible y est moins importante que la baisse de flux de chaleur latente : l'effet « albédo » vient compenser en partie l'effet « partition des flux turbulents ».

Etant donné qu'on prescrit dans chaque simulation les densités de végétation correspondantes, cet effet moyen de la différence de densité de couvert végétal est bien capturé par les deux modèles. Au-delà de cet effet densité, on peut également constater que certaines différences interannuelles plus fines, davantage liées à la phénologie respective des deux types de

couvert, sont bien reproduites par ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah. Par exemple la hiérarchie des années, en termes de biomasse, diffère entre la jachère et le champ de mil : les années les plus productives sont, par ordre décroissant, 2006, 2005, 2007 sur la jachère (fig.1.22); sur le site de mil on a vu (fig.1.14) que cet ordre était 2005, 2007, 2006. Cette différence est bien reproduite par ORCHIDEE-savannah et ORCHIDEE-mil (fig.1.14 et fig.1.22). C'est particulièrement le cas pour 2006 par rapport à 2005 : les deux modèles parviennent à représenter la réponse différente des deux couverts à ces saisons particulières, i.e. le fait que le cumul de pluie plus élevé (en 2006) favorise le développement plus important de la jachère, mais que la répartition intrasaisonnière particulière des pluies soit défavorable au développement du mil.

De même, les deux modèles simulent correctement les différences interannuelles en termes de phénologie : ORCHIDEE-savannah reproduit bien le fait que le pic de végétation ait lieu chaque année au même moment (fig.1.22, et fig.1.20 et 1.20bis pour les flux de carbone), alors qu'ORCHIDEE-mil simule de façon réaliste le décalage de pic de végétation entre les différentes années (fig.1.14, et fig.1.20 et 1.20bis pour les flux de carbone). C'est là aussi particulièrement vrai pour 2005 et 2006. Cette réponse différente correspond au fait que la phénologie de la végétation naturelle est contrainte par les conditions climatiques, alors que le mil possède un cycle déterminé (en temps thermique) : les deux modèles simulent correctement cette différence de fonctionnement des deux couverts.

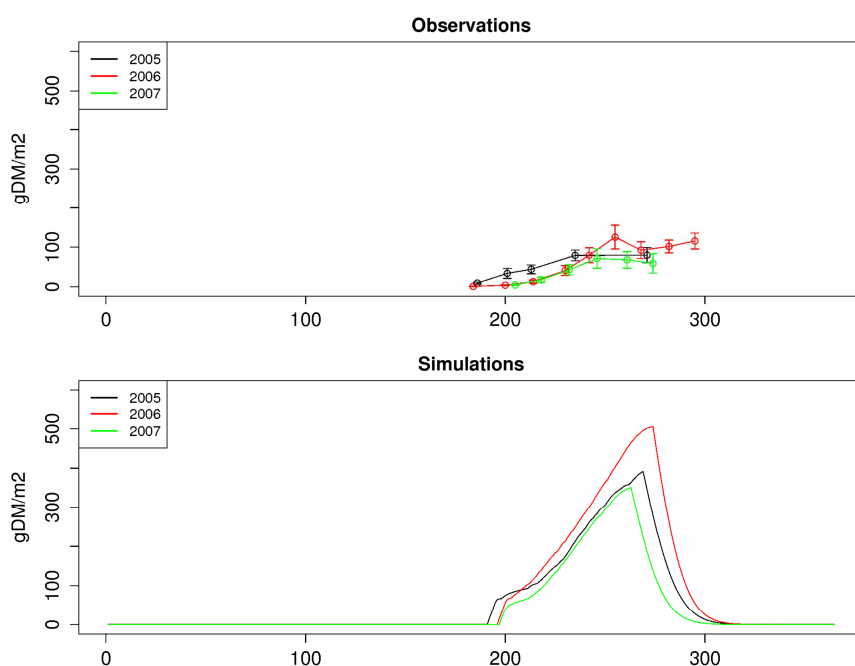


Fig.1.22 : Biomasses aériennes observées (haut) et simulées (bas) par ORCHIDEE-savannah sur le site de jachère de Wankama en 2005, 2006 et 2007.

En revanche, en fin de cycle, comme la baisse brutale d'évaporation dans les simulations d'ORCHIDEE-mil n'est pas présente dans les données (cf. section 3.3 et 3.4), la différence de flux de chaleur latente simulée entre le mil et la jachère n'est pas réaliste: en fait, on peut même constater (fig.1.21) qu'à cette période l'évaporation est légèrement plus importante sur le mil que sur la jachère, en 2005 comme en 2006. Cette différence contre-intuitive est interprétée par Ramier et al. (2009) comme le résultat du supplément d'eau stockée dans le sol sous le mil par rapport à la jachère : la végétation étant moins dense, et l'évaporation moins importante, davantage d'eau s'infiltre sous le mil que sous la jachère. Cette eau peut entretenir

une évaporation résiduelle plus importante en fin de saison des pluies – si une végétation résiduelle est présente après la récolte. De même, la NEE semble légèrement supérieure sur le mil en fin de cycle (fig.1.20 et 1.20bis). Cela est cohérent avec l'hypothèse d'une persistance, voire une reprise, de la végétation non-cultivée sur le site de mil en fin de cycle. On peut constater, néanmoins, que ce biais entre différences simulées et observées entre mil et jachère en fin de saison reste faible au regard des différences entre sites constatées pendant le cœur de la saison des pluies.

On peut donc avancer qu'avec les deux versions d'ORCHIDEE - ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah - il est possible de représenter nombre des différences essentielles entre végétation naturelle et végétation cultivée en milieu sahélien, telles qu'observées sur le site de Wankama sur les années 2005-2007: différences dans l'état moyen (assimilation, évapotranspiration), et dans la variabilité interannuelle (phénologie, amplitude du cycle saisonnier). On peut indiquer ici qu'étant donné les changements importants d'usage des sols au Sahel pendant les dernières décennies - i.e. l'expansion des zones cultivées aux dépens de la végétation naturelle - ces différences peuvent avoir un impact à plus grande échelle important en termes de stockage de carbone des écosystèmes sahéliens, de même qu'en termes d'interactions surface/atmosphère pendant la saison des pluies à travers les modifications de flux de chaleur convectifs et de recyclage de l'eau. Les résultats présentés ici montrent qu'ORCHIDEE, avec les deux versions utilisées ici, constitue un outil intéressant pour étudier ces impacts de l'évolution de l'occupation des sols sur les bilans de carbone, d'eau et d'énergie de cette région.

Résumé

Dans ce premier chapitre on a montré qu'il était possible d'introduire dans ORCHIDEE une représentation plus réaliste des cultures tropicales en se basant sur un certain nombre de formalismes issus d'un modèle agronomique. Ici ces modifications, inspirées du modèle SARRAH, portent essentiellement sur la phénologie et la dynamique de la biomasse (schéma d'allocation en particulier), avec pour but de simuler le comportement de céréales telles que le mil et le sorgho en milieu tropical, particulièrement en Afrique de l'Ouest. La nouvelle version du modèle se comporte de façon réaliste lorsqu'on la compare au modèle agronomique de référence sur site, en station expérimentale (Bambey). La simulation est significativement améliorée par rapport à la version standard d'ORCHIDEE.

Le modèle est ensuite testé en milieu paysan sur le site de Wankama (Niger), où sont réalisées des mesures de végétation et de flux surface/atmosphère. En prenant en compte les spécificités du site – dates de semis, densité de végétation - ORCHIDEE-mil représente correctement les cycles de mil observés, en termes de saisonnalité et d'amplitude, là aussi de façon plus réaliste que la version standard. Les flux surface/atmosphère (flux radiatifs et convectifs) sont globalement correctement simulés par le modèle ; toutefois, la présence d'une végétation non-cultivée sur la parcelle de mil, qui n'est pas représentée par le modèle, induit des biais dans la simulation de ces flux. En conséquence, l'amélioration de la simulation des flux surface/atmosphère par rapport à la version standard d'ORCHIDEE n'est pas proportionnelle à l'amélioration de la simulation de la biomasse de mil.

Enfin, on a vu qu'avec ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE-savannah (version d'ORCHIDEE dédiée aux écosystèmes tropicaux de type savane) il est possible de simuler les différences essentielles de végétation et de flux de carbone et d'énergie entre des couverts naturels et cultivés en environnement sahélien.

Ces premiers résultats permettent de poursuivre l'évaluation du modèle à l'échelle régionale. C'est l'objet du chapitre suivant.

II. Application d'ORCHIDEE-mil à l'échelle régionale : validité des rendements simulés à grande échelle

Après le développement et les tests sur site d'une représentation des cultures tropicales dans ORCHIDEE, l'application à l'échelle régionale permet de poursuivre l'étude et l'évaluation du comportement du modèle. Il s'agit d'utiliser le modèle en mode « off-line », i.e. forcé par des données climatiques, sur une fenêtre régionale. Ce chapitre porte essentiellement sur l'analyse des rendements, et de leur variabilité, simulés à grande échelle (l'échelle nationale ou régionale), par rapport notamment aux observations par pays fournies par la FAO (*Food and Agriculture Organization*). Pour autant que ces données FAO reflètent effectivement l'influence de la variabilité climatique à l'échelle des différents pays (cela sera discuté), évaluer la capacité du modèle à reproduire correctement cette variabilité constitue un bon test de la capacité du modèle à représenter l'impact de la variabilité climatique sur la productivité agricole. D'autre part, c'est à cette échelle – régionale, ou du moins, sub-régionale – qu'il est le plus intéressant, en termes d'anticipation des impacts et de stratégie d'adaptation, d'apporter une information aux décideurs sur les impacts sociétaux du changement climatique.

Parce que le modèle SARRAH dont est inspiré ORCHIDEE-mil s'applique principalement en Afrique de l'Ouest, et parce que cette thèse s'inscrit largement dans le cadre du projet AMMA d'étude de la mousson ouest-africaine, de ses processus et de ses impacts sur l'environnement naturel et humain, la première application régionale du modèle porte sur l'Afrique de l'Ouest. La première section de ce chapitre reprend donc un article publié dans *Climatic Change*, qui présente les simulations d'ORCHIDEE-mil sur l'Afrique de l'Ouest, et analyse la variabilité simulée des rendements par rapport aux observations de la FAO (cet article reprend également la présentation du modèle telle qu'elle a été faite au premier chapitre ; d'autre part d'autres résultats de cet article, sur l'impact d'une meilleure représentation des zones cultivées sur la simulation des flux surface-atmosphère, seront repris et poursuivis dans le chapitre suivant). Cette première section inclura également une discussion de certains éléments de cet article.

Un second article, paru dans *Geophysical Research Letters*, analyse la sensibilité de la performance du modèle - en termes de simulation de la variabilité des rendements par pays – à la qualité du forçage climatique utilisé. Il fait l'objet d'une seconde section.

Dans une troisième section, des résultats similaires et complémentaires, issus de simulations et d'analyses semblables sur une autre région (l'Inde), seront également présentés.

Dans une quatrième section on analysera dans quelle mesure ORCHIDEE-mil peut s'appliquer à la simulation de la variabilité à grande échelle des rendements d'autres cultures. Enfin une dernière section discutera et mettra en perspective certains des résultats de ce chapitre : on discutera des intérêts relatifs, à grande échelle, de la modélisation statistique et mécaniste à la lumière des performances du modèle sur les différentes régions étudiées dans ce chapitre.

1. “Including tropical croplands in a terrestrial biosphere model: application to West Africa”, *Climatic Change*

1.1 Article

L'étude présentée dans cet article repose sur des simulations d'ORCHIDEE-mil forcées par les données climatiques NCC (Ngo-Duc et al. 2005) sur la période 1965-2000, sur la bande

soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest. Ces simulations sont analysées par rapport aux données de la FAO, et l'analyse de la variabilité des rendements simulés à grande échelle suit l'approche proposée par Challinor et al. (2004, 2005), se décomposant en deux points : la capacité du modèle à représenter les relations observées entre rendements et climat, et la capacité du modèle à simuler, directement, la part de variabilité des rendements ayant une origine climatique (i.e., en éliminant les tendances technologiques, ou non-climatiques).

Including tropical croplands in a terrestrial biosphere model: application to West Africa

Alexis Berg · Benjamin Sultan ·
Nathalie de Noblet-Ducoudré

Received: 18 December 2008 / Accepted: 10 February 2010
© Springer Science+Business Media B.V. 2010

Abstract Studying the large-scale relationships between climate and agriculture raises two different issues: the impact of climate on crops, and the potential feedbacks to climate from croplands. A relevant and consistent framework to address this twofold issue is to extend existing Dynamic Global Vegetation Models, which can be coupled to climate models, in order to explicitly account for croplands. Here we present the first results of such a strategy applied to tropical croplands over West Africa. We introduce into the terrestrial biosphere model ORCHIDEE (IPSL) adequate processes and parameterisations taken from the crop model SARRAH (CIRAD), which is calibrated for millet over this region. The resulting model, ORCH-mil, realistically simulates the growth and yield of millet when tested on an experimental station in Senegal. The model is then applied over West Africa using a 36-year climate reanalysis dataset. First the model is tested in terms of yield simulation, against national millet yields from the FAO database. The ability of the model to reproduce the spatial and temporal variability of millet yields is assessed. Then, the effects on land surface fluxes of explicitly accounting for croplands are examined: significant differences between ORCH-mil and ORCHIDEE appear, through changes in sensible and latent heat fluxes, surface albedo, and water resources. These differences encompass a potential impact on the monsoon system, mainly during the retreat of monsoon rains.

A. Berg · B. Sultan
Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentation et Approches Numériques,
Institut Pierre Simon Laplace (LOCEAN / IPSL), Paris, France

A. Berg · N. de Noblet-Ducoudré
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement,
Institut Pierre Simon Laplace (LSCE / IPSL), Gif-sur-Yvette, France

A. Berg (✉)
LOCEAN/IPSL, Université Pierre et Marie Curie, Boite 100, T45/55, 4 Place Jussieu, 75252
Paris cedex 05, France
e-mail: alexis.berg@locean-ipsl.upmc.fr

1 Introduction

Studying the relationships between climate and agriculture raises two different issues.

First, agricultural production is highly vulnerable to climate, and can be considered as the most weather-dependant of all human activities (Oram 1989; Hansen 2002), with socio-economical impacts whose severity varies from one region to another (Ogallo et al. 2000). These impacts are particularly strong in developing countries in the tropics with low levels of crop management technology. In many cases they are exposed to high variability in climate like monsoon systems over West Africa or India, or the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) influence over the American continent (Challinor et al. 2003). Thus, it is crucial to increase our understanding of how crop production responds to seasonal and interannual climate variability; and it is essential that this analysis take place on a scale consistent with climate model outputs, so as to be able to make use of climate predictions—particularly in the context of a changing climate. This large-scale response, typically on a regional scale, is also the one needed for support to decision makers and agricultural planning.

On the other hand, on a regional or a global scale, agriculture plays a role in the climate system: it alters carbon and water budgets, and affects the surface energy balance (Feddema et al. 2005). Indeed, croplands account for 12% of the global land surface (Ramankutty et al. 2008); when including pastures and rangelands, nearly 50% of the potentially vegetated land surface has been affected by agriculture (Foley et al. 2005). Croplands differ from natural vegetation regarding phenology (sowing, harvest) and land management (irrigation, fertilization, tillage...). This human management modifies the biogeochemical cycles and alters the land surface biophysical properties (roughness, albedo), thus causing feedbacks to the climate (Boucher et al. 2004; de Noblet-Ducoudré et al. 2004).

A relevant framework to address this twofold issue is the extension of existing Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs), originally designed to account for interactions between the atmosphere and the land surface, to include a representation of croplands (Betts 2005; Pielke et al. 2007). So far, few terrestrial biosphere models have included detailed representations of managed ecosystems: Kucharik and Brye (2003) have added crop process modules to the land biosphere model IBIS (Foley et al. 1996) to simulate the impacts of climate and land management on crop production and biogeochemistry in the US corn belt (Donner and Kucharik 2003); Osborne et al. (2007) have included the large-scale agronomic model GLAM (Challinor et al. 2004) into the land surface component of the UK Met Office climate model HadAM3; and Bondeau et al. (2007) have added several crop functional types into the LPJ-DGVM (Sitch et al. 2003) to simulate yields of the major crops worldwide and analyse the role of agriculture on the 20th century global terrestrial carbon balance. Despite these recent advances, however, realistically accounting for the variety of croplands globally in a coupled land/atmosphere model remains a challenge for the Earth System modelling community.

The objective of this paper is to propose a preliminary approach to include tropical croplands in a DGVM that can either be used off-line, as a diagnostic or impact tool, or on-line, that is coupled to a global atmosphere–ocean model. To start with, we have worked on millet crop in West Africa. West Africa is a region which well

illustrates the two-way influence between climate and agriculture, since the latter is almost entirely rain-fed and highly dependant on the fluctuations of the West African Monsoon (WAM; Sultan et al. 2005; Baron et al. 2005). Developing a tool which simulates the large-scale response of crops to this regional climate variability is then of great interest to analyse and predict the impacts on food production and security, in the only region worldwide where agricultural production per capita has decreased over the last 40 years (Dyson 2001). On the other hand, surface characteristics play an important role in the WAM precipitation variability on seasonal, inter-annual and decadal time scales. Although Atlantic oceanic forcing is the dominant driver of WAM variability (e.g., Giannini et al. 2003), several modelling studies have shown that the twentieth century drought in West Africa is most likely to have been amplified by human-induced land use/land cover changes, and by the regional climatic feedback due to the vegetation dynamics and soil moisture (see for instance Zheng and Eltahir 1997, 1998; Wang and Elathir 2000; Foley et al. 2003; Wang et al. 2004). Thus, improving simulations of managed ecosystems in West Africa might help to analyse the impact of land-use on the monsoon system.

We present an original methodology to include millet crop into the DGVM ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems; Krinner et al. 2005) which is the land surface model developed by the IPSL institute (Institut Pierre-Simon Laplace). In its original version, ORCHIDEE crudely accounts for croplands as simple grasslands with enhanced photosynthetic capacities. A new version of this model has recently been developed in order to improve the representation of croplands for developed countries in temperate regions (Gervois et al. 2004). In this version, ORCHIDEE assimilates daily outputs from the generic crop model STICS (Brisson et al. 2003), for variables which are either badly simulated (e.g. Leaf Area Index) or missing (e.g. nitrogen stress). However, so far STICS has not been calibrated to simulate tropical crops; the resulting ORCHIDEE-STICS model is only designed for temperate C3 and C4 crops, such as wheat and maize, allowing studies over regions such as Europe (Smith et al. 2010). Moreover, although the assimilation method adopted for this version allowed taking advantage from further improvements in STICS with minimum adjustments in ORCHIDEE, it also implies redundancies in the computation of carbon and water budgets, which may generate inconsistencies in case of divergence between the two computations. Thus, in our case the approach we choose in order to improve the representation of tropical crops in ORCHIDEE is to include directly, in the standard version of ORCHIDEE, specific processes and parameterisations taken from an existing crop model already well calibrated and validated for millet over the West African region. The model we derive these parameterisations from is named SARRAH and has been developed by the CIRAD (French Agricultural Research Centre for Agricultural Development; Dingkuhn et al. 2003). We will refer to the resulting model as ORCH-mil. It is presented herein and we show (1) its ability to capture the relationship between climate and crop productivity and to simulate crop yields at a regional scale, (2) how explicitly accounting for croplands in ORCHIDEE modifies the biophysical properties of the land surface and the fluxes of heat and water vapour exchanged at the land/atmosphere interface.

In a first section we present the models and data used in our study. A second section describes the developments from ORCHIDEE to ORCH-mil, which is tested over one typical semi-arid location in Senegal. ORCH-mil is then applied over a large

regional window of West Africa: the third section compares simulated yields with national census data from the FAO (Food and Agriculture Organization). The last section analyses the modifications of the land surface energy budget induced by an improved representation of croplands. The conclusion sums up the main results and discusses the future development priorities and challenges.

2 Materials and methods

2.1 ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystem)

ORCHIDEE (Krinner et al. 2005) is the dynamic global vegetation model developed at IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace). It simulates water, carbon (C) and energy exchanges between the land surface and the atmosphere. It is designed to be coupled to a global climate model, in order to allow analysis of vegetation and land-use feedbacks on climate. In a more simple way, it can also be used “off-line” (i.e. forced by meteorological data) to assess the impact of climate on ecosystems: Ciais et al. (2005), for example, showed that ORCHIDEE reasonably simulates the response of natural ecosystems in Europe to a climatic anomaly such as the 2003 heat wave.

ORCHIDEE consists of three main modules:

- The Soil–Vegetation–Atmosphere Scheme SECHIBA (Ducoudré et al. 1993; De Rosnay and Polcher 1998) which simulates biophysical exchanges of water and energy between land surface and atmosphere on a short time-scale (half-an-hour). It computes fluxes of momentum, heat, water, and canopy C exchanges, as well as soil water budget and surface energy budget.
- The biogeochemical model STOMATE which describes seasonal C and vegetation dynamics on a daily basis: for instance phenology, C allocation, litter production and decomposition, senescence. This module provides SECHIBA with the physical description of vegetation necessary to compute fluxes (e.g., Leaf Area Index (LAI)). In return it receives the environmental and climatic stresses that affect vegetation development. Note that plant transpiration, respiration and assimilation are computed in SECHIBA since these processes have to be computed at the shortest time-scale.
- A module taken from the Lund–Postdam–Jena (LPJ) model (Sitch et al. 2003) describing the dynamics of the potential natural vegetation (i.e. long-term evolution of vegetation from one type to another). It includes rules of interspecies competition for light, role of fire, appearance and disappearance of different plant types, etc. Time-step here is generally 1 year. This module can be turned off and vegetation distribution prescribed, or read on a land-cover map.

To account for global vegetation, ORCHIDEE in its standard version uses 10 natural plant functional types (PFTs) (eight evergreen and deciduous trees, C3 and C4 grasses). Two additional PFTs are designed, so as to account for C3 and C4 crops: in the standard version these crops are crudely modelled as, respectively, C3 and C4 grasslands, with enhanced assimilation rates. The global land surface is divided into grid cells, which size is not prescribed but depends on the grid size of climate input. Several PFTs can coexist within the same grid box (but there is no spatial repartition within the cell). They all share the same climate forcing but fluxes are computed

separately for each PFT depending on their own properties. Fluxes are then averaged before entering the first atmospheric level: thus the vegetation feeds back on the atmosphere.

2.2 SARRAH

SARRAH (Dingkuhn et al. 2003) is a crop modelling platform developed on the basis of SARRA, the water balance model frequently used by agronomists and agro-meteorologists working in the Sahel (zoning and risk-analysis: Affholder 1997; Baron et al. 1999, yield forecasting: Samba 1998). SARRAH based models typically simulate attainable yields at field scale. Extrapolation from plot to region is routinely done by Agrhymet (Niamey, Niger; see <http://www.agrhymet.ne>) for agro-meteorological forecasting using the DHC system, which includes SARRA as a component (Samba 1998; Samba et al. 2001). The version of SARRAH calibrated for millet was structured to enable such applications as well, but with greater physiological details. It combines a water use efficiency approach—with daily simulation of water run-off and infiltration, soil evaporation and ground cover transpiration, fraction of transpirable soil water—and a radiation use efficiency approach to simulate C assimilation and partitioning according to allometric rules (see Baron et al. 2005 for further details on the model). The crop cycle length depends on fixed thresholds of thermal time. SARRAH has been calibrated and validated on several independent experimental datasets for field grown millet in Senegal (Baron and Sarr, unpublished data; Sultan et al. 2005; Baron et al. 2005).

2.3 Climate data

2.3.1 *The NCC atmospheric forcing*

NCC is a large-scale atmospheric forcing dataset (Ngo-duc et al. 2005) specifically designed to force land surface schemes, and that is now being used in a number of intercomparison projects (e.g. ALMIP, de Rosnay et al. 2009). The dataset is built on NCEP/NCAR reanalysis (National Centre for Environmental Prediction/ National Centre for Atmospheric Research) corrected by observational data from CRU (Climate Research Unit; New et al. 1999, 2000). The variables in the meteorological data are divided into two types: state variables (near-surface air temperature, specific humidity, wind speed and surface pressure) and flux fields (radiation and precipitation). The data construction involves two steps: interpolation of the NCEP/NCAR Reanalysis data to a grid of $1^\circ \times 1^\circ$ and correction of reanalysis data with the observationally based data. NCC extends from 1948 to 2000 with a spatial resolution of $1^\circ \times 1^\circ$ and a 6-hourly temporal resolution. The NCC data set was validated by comparing discharges of the world's largest rivers simulated by ORCHIDEE forced with different meteorological data. It has proved to be very useful in the study of the evolution of continental water storage during the past 50 years (see Ngo-duc et al. 2005).

2.3.2 *The Bambey synoptic station*

The daily climate data from the synoptic station (measuring global radiation, insolation, surface wind speed, humidity and temperature) and the rain gauge in Bambey

National Research Station (BNRS) has been used to calibrate and validate the crop model SARRAH. It is a typical Sahelian location (16.5°W–14.7°N) in Senegal with an annual rainfall amount varying typically between 350 and 650 mm per year. Two years of daily data were available: 1996 and 1997. The two models SARRAH and ORCHIDEE were forced with this climate input. However, whereas SARRAH can use data from the local weather station at a daily time step, ORCHIDEE needs data at the half-hourly time step. Thus BNRS data needed to be disaggregated. For this we extracted the 1996 and 1997 NCC (see previous sub-section) data for the $1^\circ \times 1^\circ$ grid-cell corresponding to Bambey and applied the NCC diurnal cycle to the BNRS daily values. We obtained 6-hourly data that were further interpolated by ORCHIDEE at the half-hourly time-step. This has been done for radiation and temperature; for rainfall, we used satellite imagery. Rainfall probability computed every 15 min using data from Meteosat-Second-Generation for the year 2004 was used to estimate a typical hourly distribution of rainfall. This distribution has then been applied to disaggregate 1996 and 1997 BNRS daily values. Thus, ORCHIDEE is forced with a 6-hourly-disaggregated BNRS dataset.

2.4 Crop data

2.4.1 The Bambey National Research Station

Measurements of biomass, grain production and LAI are available for the BNRS in Senegal for two consecutive years 1996–1997 and several water irrigation regimes, including rain-fed situations. These data have been initially used to calibrate and validate the crop model SARRAH. Both biomass and grain production were simulated satisfactorily by the model (Sultan et al. 2005; Baron et al. 2005). We will thus use the SARRAH simulations as a proxy of these data.

2.4.2 The Agrhymet survey

Long-term means (1971–2000) of sowing dates and millet yields have been computed by the regional centre Agrhymet: a water budget model is forced by rainfall observations on a 0.5 degree scale; results are then empirically converted into yields values by statistical relationships based on on-farm observations. Sowing dates are computed according to a rainfall threshold method, and validated by local observations as well.

Thus, this is a model-based product but corrected and validated by in-situ observations (Samba 1998; Samba et al. 2001): in the absence of any reliable spatialized data for yields and sowing dates, it can be considered as a good approximation to on-farm reality.

2.4.3 The FAO statistics

The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) compiles data annually on various agricultural production statistics of its member nations. This is, to our knowledge, the only source available for long time series analysis of cross-national agricultural data. For West African countries, the FAO on-line database (<http://faostat.fao.org/>) contains annual agricultural statistics from 1961 to present: for millet, average yields, harvested area and total production are reported. This allows us to test the yields simulated by our model on a national scale, over the 1965–2000 period.

However, one must remember that the FAO data are a compilation of results reported by member nations, rather than direct observations. Consequently, such data can often be biased by under or over-reporting of agricultural production, or because poor countries do not have the resources or infrastructures to conduct rigorous surveys (Ramankutty 2004). In West Africa, given the lack of resources and infrastructures, and the numerous civil wars or political instabilities that took place in various countries since the 60's, the quality of the statistics must be considered carefully. Moreover, yield data may show trends unrelated to climate. Figure 1 shows FAO millet yields from 1965 for several of the most important millet producing countries in West Africa: it is striking that some countries show increasing yields over time (Burkina-Faso, Senegal), when others face decreasing values (Chad, Niger). While local climate fluctuations may play a role in these trends (for example, rainfall recovery since the early 90's), non-climatic factors are likely to be the dominant drivers. Explaining the causes of these trends is nevertheless not straightforward. Positive trends in developed countries are usually attributable to the intensification of agriculture (i.e., the use of improved varieties, fertilizers and chemicals, mechanization), but agricultural practices in West Africa have not significantly intensified over recent decades. Land-degradation, intra or extra-national migrations, economic crisis, etc. may also have significant impact on national yields evolution. Because these potential non-climatic effects will not be simulated by any climate-driven-only crop model, one needs to detrend observations when analysing interannual

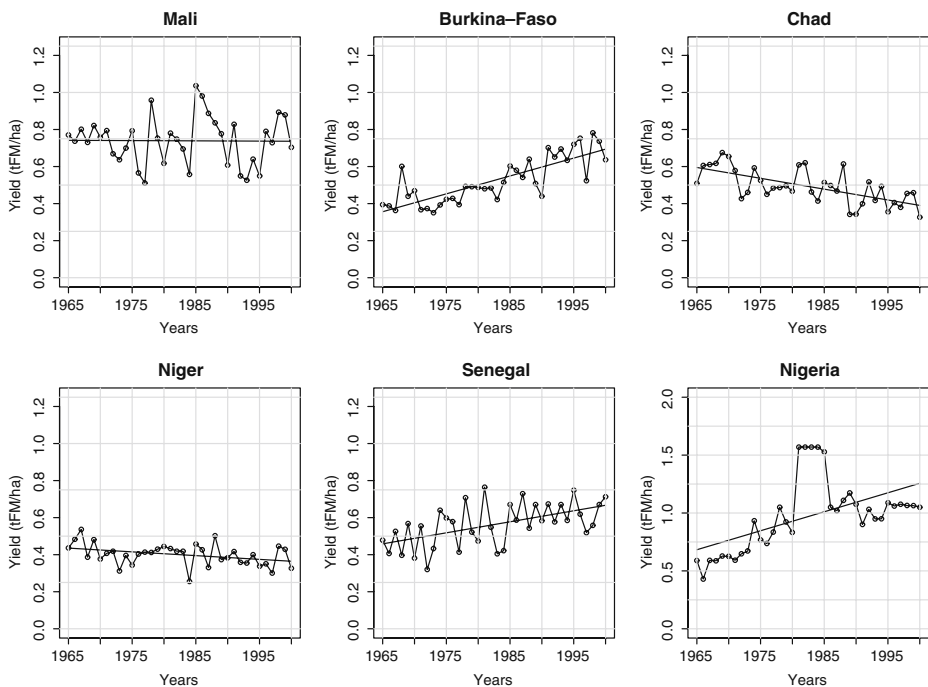


Fig. 1 National millet yields (in tons of fresh matter per hectare) from 1965 to 2000 for several West African countries, as given by the FAO database. *Dashed lines* show linear trends that will be removed to compute detrended standardized anomalies

variability. It will be done in this study very simply by removing the linear trend ($y = at + b$, which are shown on Fig. 1) from each time series. Since sorting out climatic and non-climatic effects is not possible, this might also remove potential climate-driven trends. As in such a case simulated yields would show a trend as well, detrending observations also implies to detrend simulated yields before comparing them to observations; finally it also implies to detrend climate data when analyzing climate/yield relationship.

3 From ORCHIDEE to ORCH-mil

3.1 ORCHIDEE first guess

Our first step is to compare the outputs of ORCHIDEE and SARRAH for the same location in West Africa and the same year: the BNRS in 1997. Both models are forced with the same climate input (see Section 2.3). Regarding soil structural parameters, SARRAH uses a sandy soil, whereas ORCHIDEE uses the same mean type of soil with average characteristics as it always does. This is not satisfactory, but improving ORCHIDEE's ability to describe soil diversity was not the purpose of this study. The same observed sowing date is prescribed in both simulations, July 19th.

Figure 2 compares the outputs from both models in terms of LAI and biomass (total and compartmental biomasses). Because ORCHIDEE represents millet as a

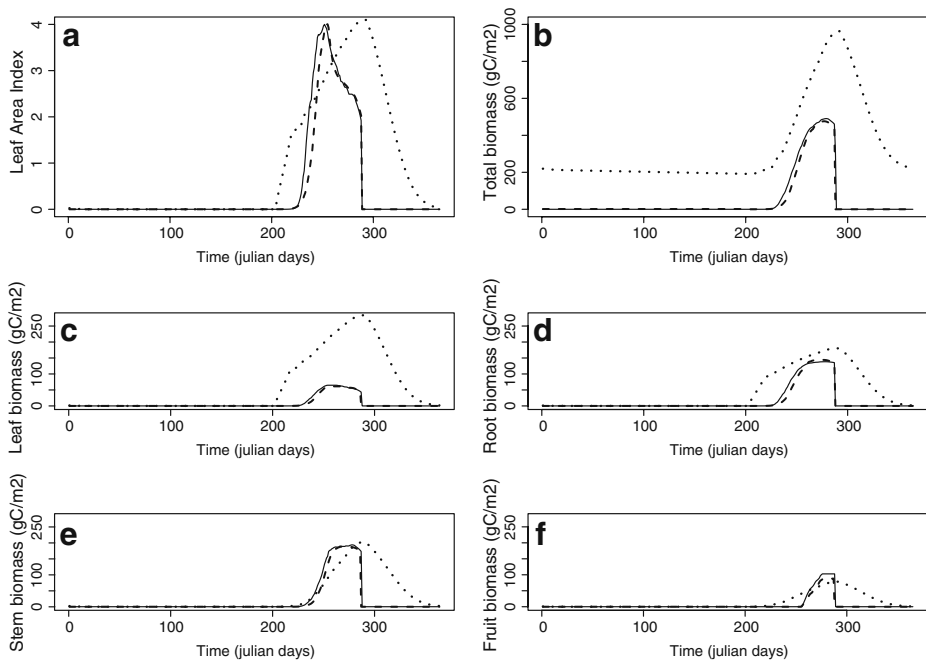


Fig. 2 Comparison between standard version of ORCHIDEE (*dotted line*) and SARRAH (*full line*) for simulations of **a** Leaf Area Index, **b** total biomass, **c** leaf biomass, **d** root biomass, **e** stem biomass, and **f** fruit biomass, for year 1997 in Bambey, Senegal (biomasses are in grams of carbon per square meter). *Dashed lines* show the same simulation by ORCH-mil

natural C4 grass with enhanced photosynthesis, the cycle is too long, mainly due to the absence of harvest. Moreover, growth at the beginning of the cycle is too quick: in ORCHIDEE, growth starts immediately after sowing and is linear. ORCHIDEE does not simulate the long exponential development of the plant at this early stage. This immediate growth results from the presence of a “reserve” carbon pool in the model, which can be seen on the “total biomass” graph (Fig. 2b): the reserve remains full during the dry season (the steady 200 gC/m² line), and is used by the plant to grow rapidly at the beginning of the rainy season—and finally is filled up again, until next cycle. This storage ability, initially designed for “tree” and “perennial grass” PFT in ORCHIDEE, is clearly unrealistic for annual grasses.

Total biomass in ORCHIDEE is too large, mainly because of this reserve pool and because of the overestimation of leaf biomass (Fig. 2c). The low prescribed Specific Leaf Area (SLA) value allows the LAI maximum value to be close to the one given by SARRAH (LAI = SLA × leaf biomass). However, this constant SLA implies that LAI in ORCHIDEE is directly proportional to leaf biomass. The resulting LAI dynamics can not, then, match that of SARRAH, in which SLA is more realistically parameterised as a function of leaf growth rate and implies a more complex LAI dynamics.

3.2 ORCH-mil

In order to turn ORCHIDEE’s “super-grassland” into a realistic tropical cropland PFT, we suppress the reserve pool, and we include SARRAH’s carbon allocation scheme, as well as SLA parameterisation. We make the assumption that it is not necessary to bring complex modifications upstream to the C and water budgets. Only allocation dynamics will be changed, thus implying modifications only in the STOMATE part of ORCHIDEE (see Section 2.1). This approach of “minimum change” is generally the one adopted by vegetation modellers who wish to account for croplands in global land surface schemes (Scholze et al. 2005). As 2 years of BNRS data are available (1996–1997), all changes in ORCHIDEE are done in order to match the 1997 outputs of SARRAH, and the year 1996 is kept unseen by the model, as an independent validation dataset.

Hereafter we present the details of our model for which modifications in ORCHIDEE were necessary. For further description of unmodified ORCHIDEE’s parameterisations (e.g., soil carbon or water dynamics), please see Krinner et al. (2005) and references herein.

3.2.1 Growth and development

The crop can either be sowed on a prescribed date, or sowed depending on a rain criterion in order to approximate farmer’s decision. Sowing biomass is prescribed.

The millet cycle is divided into six different stages. Harvest takes place at the end of the last stage. The length of these stages is prescribed as a sum of growing degree days (gdd) to be reached. Thus, a gdd counter is added to ORCHIDEE: thermal time, for a day j after the beginning of the crop cycle, is given by:

$$GDD_j = \sum_{i=S}^j (\min(T_{opt}, T_i) - T_b)$$

where S is the date of the beginning of the crop cycle, T_{opt} is a temperature above which additional heat is inefficient (30°C), T_b the base temperature below which development ceases (11°C); T_i is the mean air temperature of day i provided by the climate forcing.

Stages 1 to 3 are vegetative stages, stage 4 is the floral stage, stage 5 grain filling, and stage 6 mere senescence. Each day during stage 1 to 4, total biomass is partitioned between roots, stems and leaves according to empirical, allometric rules (Samba et al. 2001):

$$BM_{abg} = B_{mtot} * (a * BM_{tot} + b)$$

$$BM_{leaf} = BM_{abg} * (a' * BM_{abg} + b')$$

$$BM_{root} = BM_{tot} - BM_{abg}$$

$$BM_{stem} = BM_{abg} - BM_{leaf}$$

where BM_{tot} , BM_{abg} , BM_{leaf} , BM_{root} , BM_{stem} , are, respectively total, above-ground, leaf, root and stem biomasses (in gC/m^2). a , a' , b , b' , are empirical parameters, respectively $4.44 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{gC}$, $-2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{gC}$, 0.5 and 0.63.

Note that the “Reserve” pool no longer exists. No biomass is allocated to the fruits during these 4 first stages.

Biomass produced during stage 4 (floral stage) determines the “grain sink” that is, the maximum yield that the plant can reach at the end of the growing season. Any stress occurring during that stage therefore reduces this potential yield.

$$PotY = K * (BM_{e4} - BM_{i4}) + C$$

where BM_{e4} and BM_{i4} are respectively total biomasses at the end and at the beginning of stage 4, and $PotY$ is potential yield (i.e., grain sink). K and C are parameters, respectively 0.35 and $45 \text{ gC}/\text{m}^2$.

This grain sink is filled during stage 5: allocatable biomass is then allocated in priority to the “fruit” carbon pool. Each day a part of this sink is filled, depending on current water stress. For one day in stage 5:

$$DayY_i = PotY * \left(\frac{(T_i - T_b)}{GDD5} \right) * Wl$$

$$\text{And: } BM_{fruit_i} = BM_{fruit_{i-1}} + DayY_i$$

where $DayY_i$ is the biomass allocated to the “Fruit” pool on day i , T_i is the mean temperature of the day and $GDD5$ the sum of growing degree days necessary to complete stage 5. Final yield is BM_{fruit} at the end of stage 5. Wl is a drought reduction term: in SARRAH, it is given by Tr/Tr_{Pot} (ratio of real plant transpiration to potential transpiration as defined by plant development and climate evaporative demand); however, ORCHIDEE computes no plant potential transpiration. Hence, in our version Wl is given by Ev/Ev_{Pot} (ratio of actual evapotranspiration to potential evapotranspiration), which can be considered as close enough to Tr/Tr_{Pot} in the end of the crop cycle, since soil evaporation becomes less important due to radiative shading by foliage density.

Thus, if no water stress occurs during stage 5, final yield reaches potential yield. Grain filling also induces leaf senescence if sink capacity exceeds current assimilation rate: missing biomass is then taken mainly from leaves, and also from stems. Half of

this biomass is lost during this translocation process, so as to account for an energetic cost. This detailed grain filling scheme allows for variable harvest indexes. Note that neither SARRAH nor ORCHIDEE includes, so far, any representation of nitrogen stress: thus in ORCH-mil millet is not nitrogen-limited.

Stage 6 is mere senescence: the plant dries up, until harvest at the end of the stage. In the present version of ORCH-mil all the biomass then goes into litter; but a separate parameterisation for grains will be designed in the near future since that carbon pool returns to the atmosphere with a different time constant.

3.2.2 SLA and LAI

The SLA parameterisation used to convert leaf biomass into LAI depends on leaf growth rate and on genetic minimum and maximum values (Penning de Vries et al. 1989):

$$SLA_j = \min(SLA_{\max}, \max(SLA_{\min} Z_j))$$

where

$$Z_j = SLA_{j-1} - A * (SLA_{j-1} SLA_{\min}) * \left(\frac{(BM_{\text{leaf}} - \text{Day}BM_{\text{leaf}})}{BM_{\text{leaf}}} \right) + SLA_{\max} * \left(\frac{\text{Day}BM_{\text{leaf}}}{BM_{\text{leaf}}} \right)$$

where DayBMleaf is the daily increment of leaf biomass. Maximum and minimum SLA values are $1.44\text{e-}01$ and $4.44\text{e-}02 \text{ m}^2/\text{gC}$. A is 0.2.

LAI is then classically given by $SLA * BM_{\text{leaf}}$. This parameterisation, instead of a constant prescribed value, allows for a more detailed representation of the existing relations between leaf growth and LAI: SLA is stronger for young thin leaves, and decreases as they get older and thicker.

3.2.3 Respiration and senescence

ORCHIDEE and SARRAH do not represent senescence similarly. In SARRAH, respiration is only maintenance respiration, which depends on temperature and biomass (Penning de Vries et al. 1989): at the end of the crop cycle, respiration is stronger than Gross Primary Production (GPP), resulting in a negative Net Primary Production (NPP). In other words, there is a short period of senescence, before harvest, during which this negative NPP drives a loss of biomass.

Conversely, respiration in ORCHIDEE is predominantly growth respiration, as a constant “tax” on allocatable biomass. Maintenance respiration, depending on biomass and temperature (following Ruimy et al. 1996), is comparatively much weaker (for C4 grasses). Thus, GPP is almost always stronger than total respiration (the sum of maintenance and growth respirations), and NPP is almost never negative. Plant senescence, i.e. loss of biomass, is driven by other parameterisations depending on climatic conditions: temperature, humidity.

Because we compute a rainfall-based sowing date and prescribe a fixed cycle duration, it is not relevant to keep a climatic-driven senescence in ORCH-mil: the timing

of the different phases of the plant cycle in the model are not related to climatic conditions (other than temperatures sums). Thus, we are led to modify respiration in ORCHIDEE: growth respiration is suppressed, and maintenance respiration is enhanced (the formulation remains unchanged but parameters are set to higher values), so that the respiration/senescence representation in ORCH-mil is similar to that of SARRAH.

3.2.4 Photosynthetic capacities

As mentioned above, we do not modify the photosynthesis parameterisation: carbon assimilation in our new version still follows Collatz et al. (1992), a coupled photosynthesis-stomatal conductance model for C4 plant. Indeed, this formulation yields similar GPP values as the formulation in SARRAH—which is based on the conversion of photosynthetically efficient radiation into dry matter (Sinclair and Mudchow 1999)—and in addition allows to account for future differences in atmospheric CO₂ concentration.

However, we slightly modify a specific parameter: the assimilation maximum rate V_{cmax} (maximum rate of Rubisco carboxylation): its maximum value is reset to 80 μmol s⁻¹ m⁻², instead of 100 in the former “super productive grassland” parameterisation; moreover, a linear decrease in stage 5 and 6 is prescribed, respectively from 100% to 70% of the maximum value and from 70 to 40%. This linear trend accounts for a decrease in photosynthesis capacities with older leaves. ORCHIDEE supposedly already accounted for decreasing photosynthetic capacities through a parameterisation of leaf age; but the allocation scheme we introduced made it impossible to rely on the computed leaf age any more. Thus, we parameterise the same decreasing trend for V_{cmax} as the one affecting radiation conversion efficiency in SARRAH.

The new version ORCH-mil resulting from the above modifications is calibrated on Bambey for 1997. The outputs are shown on Fig. 2 in dashed lines: ORCH-mil matches SARRAH (and thus, the observations) very accurately.

3.3 Site evaluation of ORCH-mil in Senegal

Since the calibration and parameterisation phase has been done in regard to the 1997 BNRS data, a validation exercise can be built in by forcing ORCH-mil with climate data over the same location but for 1996, a year unseen by the model in the calibration section. Figure 3 shows the same comparison as Fig. 2, but for 1996.

ORCH-mil matches SARRAH reasonably well. Remaining discrepancies mainly result from differences in soil water and water stress parameterisation, which we did not modify. Indeed, an under-reaction to water stress appears around day 260: ORCH-mil biomass is not enough impacted by a dry spell occurring during stage 5, and the supplementary biomass is allocated to stems. This mismatch however remains acceptable. On the two available years of BNRS data (96 and 97), it can thus be considered that ORCH-mil overall realistically represents millet when compared to SARRAH. However, this remains a limited and preliminary test, and ORCH-mil should be further tested on other experimental sites in West Africa where in situ measurements are available.

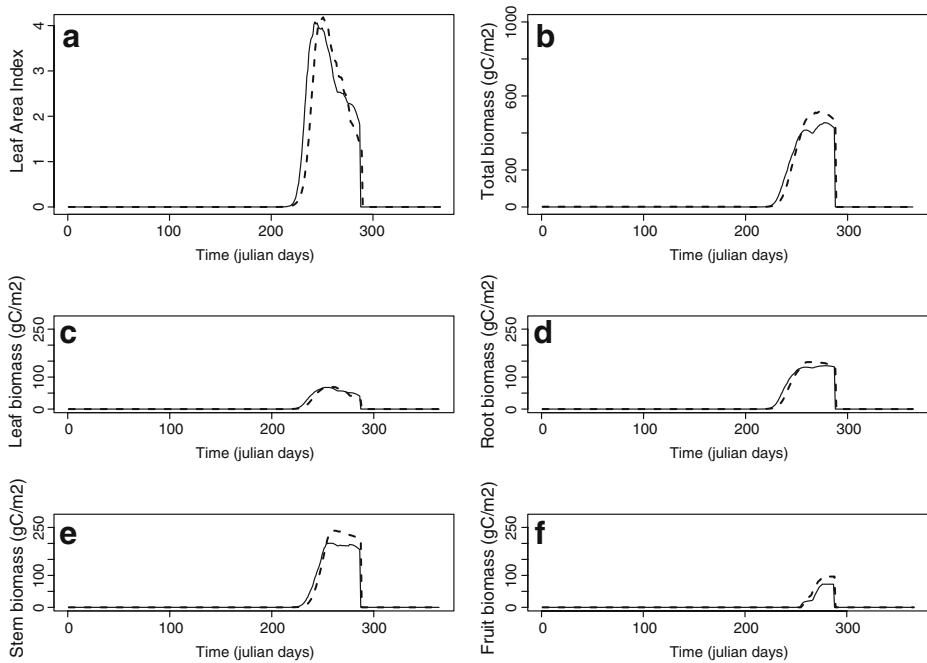


Fig. 3 Comparison between ORCH-mil's (*dashed line*) and SARRAH's (*full line*) simulations of **a** Leaf Area Index, **b** total biomass, **c** leaf biomass, **d** root biomass, **e** stem biomass, and **f** fruit biomass, for year 1996 in Bambey, Senegal (biomasses are in grams of carbon per square meter)

4 Simulation of yields over West Africa

4.1 ORCH-mil at regional scale

We now run the model on a regional scale. We force ORCH-mil with the NCC climate data from 1965 to 2000 over a regional window of West Africa (9°N–20°N; 20°W–24°E—see Fig. 4) broadly corresponding to the zone suitable for millet production. Since millet production in West Africa is entirely rain-fed, we do not use the irrigation module of ORCHIDEE (de Rosnay et al. 2003).

Millet is simulated everywhere across the simulation domain. However, simulated yields are to be compared to FAO observations, which, as mentioned in Section 2.4, are given as country averages. It is thus necessary to aggregate simulated yields from the 1° × 1° scale to the country level. In order to make a realistic comparison to observations, one must account for the observed millet spatial distribution in the aggregation. Combining national, state, and county level census statistics with a global data set of croplands, Monfreda et al. (2008) built global distribution maps for most of the crops (175) grown around the world, at a 5 min resolution. We use the map they provide for millet, over West Africa (Fig. 4). Although this map is only supposed to describe the current (circa year 2000) situation, we use it for the whole simulation time period, for we are aware of no similar explicit millet map going back into recent decades. FAO data indicate that the total millet area in Mali and Burkina-Faso has nearly doubled from 1960 to present, and quadrupled in Niger. Hence, the assumption we make here is that although the crop fractions increased locally, the

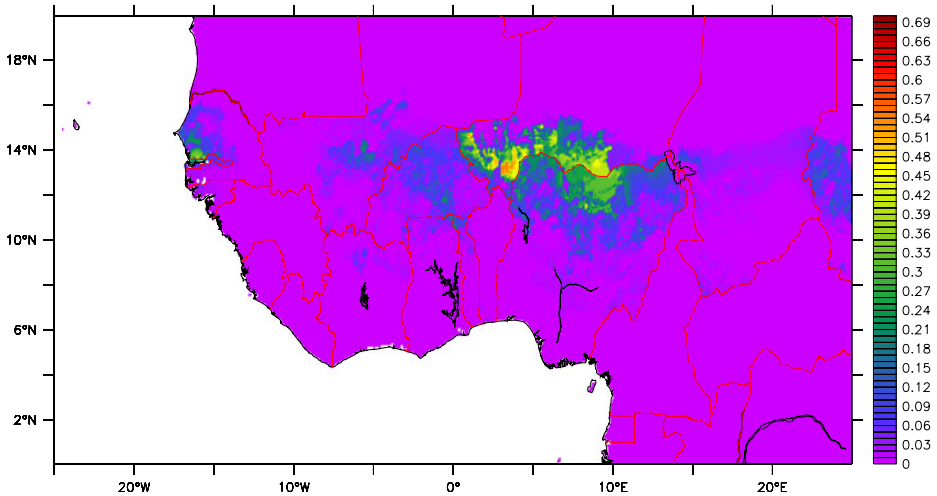


Fig. 4 Millet spatial distribution (in pixel fractions) over West Africa. Redrawn from Monfreda et al. (2008)

general pattern of millet cultivation and the relative weight of the different regions within one country remained broadly constant.

Yields per country are then derived by weighing the pixels of each country by their crop fraction. Similarly, we also aggregate rainfall as provided by the NCC climatology to derive the “national” rainfall. The countries considered in this study are Mali, Niger, Burkina-Faso, Senegal and Chad. Although a large millet producer, according to Fig. 4, we do not consider Nigeria in our analysis, as FAO data for this country shows major shifts (Fig. 1) which hampers comparison to simulations.

Two types of millet are used, with different cycle lengths. GDD requirements for the different stages of each cultivar are given in Table 1. Given average temperatures in the region, the first one approximately corresponds to a 90-day cultivar, appropriate for short rainy seasons in the Sahelian region; the second one to a 120-day cultivar, more appropriate for the longer rainy seasons in the sahelo-soudanian region. Note however that because of the dependence of cycle length on sums of temperature, a prescribed GDD requirement still leads to a latitudinal gradient of crop cycle duration. We run two separate 36-year regional simulations, one for each type of millet, 90-day and 120-day. We choose the most appropriate one per country *a posteriori*, selecting the one that best fits with observed data. Each simulation starts with a 15-year spin-up run forced with the climate observed in 1965, to initialize soil water conditions (since the model starts with soils at field capacity at all grid points).

Table 1 GDD requirements (in sum of °C day) for the different crop cycle stages in ORCH-mil, for the 90-day (left) and 120-day (right) cultivars

Stage 1	50	50
Stage 2	410	710
Stage 3	30	30
Stage 4	470	570
Stage 5	400	500
Stage 6	200	200
Total	1,560	2,060

4.1.1 Sowing dates

In order to apply ORCH-mil at the regional scale, it is necessary to parameterise the sowing date. Indeed, a single sowing date can not be prescribed over the whole region: we have to account for the south–north gradient in the planting date, which reflects the south–north gradient in the onset of monsoon rains. Based on a rain-threshold approach, derived from farmers' strategy (Ati et al. 2002; Sultan et al. 2005) the following methodology, is adopted:

- A planting window is prescribed, outside which sowing is not allowed (from early May to the end of August)
- Until day 180 (end of June), the sowing date is defined as the first day with either more than 20 mm of rain in 1 day, or 30 mm in two or three consecutive days.
- After day 180, criteria become less restrictive: the crop season begins when three consecutive rainy days occur, with a total sum of more than 10 mm.

A parameterisation is also introduced which allows a second sowing, in case the first one fails (that is, after 2 weeks, the plant has not grown). This is to account for the fact that the first rains during the planting window might be isolated and not correspond to the real beginning of the rainy season: the sowing is then too early and the plant can not grow, because of water stress. This also mimics the behaviour of farmers who do re-sow in case nothing comes out after the first attempt (Graef and Haigis 2001).

Figure 6 compares the 1971–2000 mean sowing dates computed by ORCH-mil with the 1971–2000 mean sowing dates given by the regional centre Agrhymet, which we consider as a good approximation of ground truth (see Section 2.4). The two maps are fairly similar with sowing dates from early May in the south to end of July above 15°N. This zonal gradient is imposed by the northward progression of the monsoon system over the region. The larger area covered with late simulated sowing dates in ORCH-mil results from the extensive distribution of millet we have prescribed.

4.1.2 Simulated yields

Figure 6b shows the mean yield computed by ORCH-mil over 1971–2000, for the 90-day millet simulation. As expected, the spatial distribution of simulated yields is very close to the annual rainfall distribution (Fig. 5a), with a similar zonal gradient. The rainfall dependence induces a strong interannual variability of yields in the sahelian region where rainfall is more variable, as shown by the high values of the variation coefficient (standard deviation relative to the mean) in the north of the simulation domain (Fig. 6c).

Figure 6d shows attainable yields of 90-day millet as given by the regional centre Agrhymet (see Section 2.4). These observation-corrected values show a similar latitudinal pattern of mean yields: this general feature is correctly captured by ORCH-mil. However it also shows that ORCH-mil largely overestimates yield values, by a factor 2 to 5, an overestimation which increases towards low latitudes. Table 2 compares the observed (FAO) and simulated means and standard deviations of millet yield (from the same 90-day simulation) for Niger, Burkina-Faso, Chad, Senegal and Mali: ORCH-mil strongly overestimates both the mean and the inter-annual variability of yields.

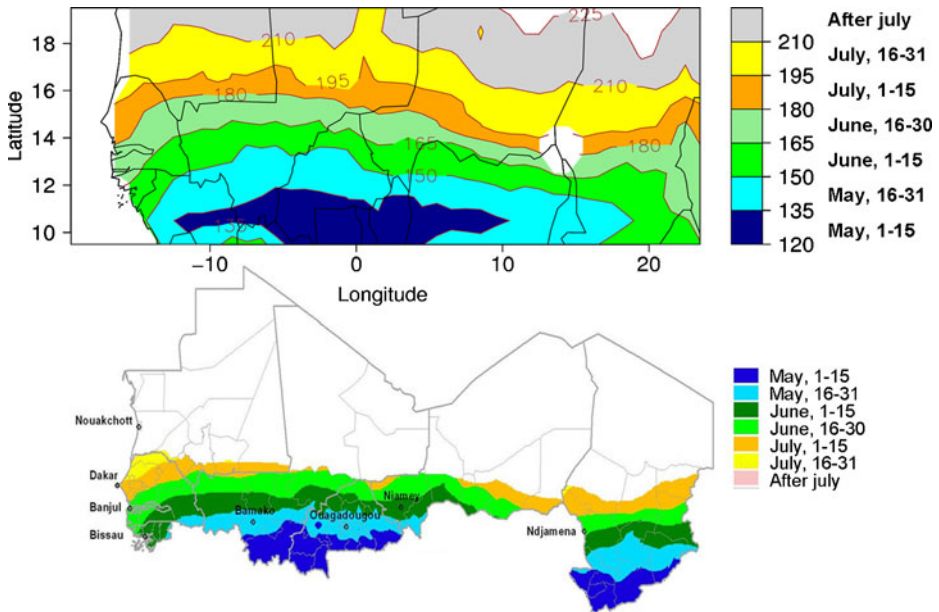


Fig. 5 Average sowing dates for millet (*top*), as computed by ORCH-mil over 1971–2000 (*bottom*), as given by the Agrhymet regional Centre over 1971–2000

This overestimation results from the differences between agricultural conditions in experimental research stations, and on-farm conditions. ORCH-mil, like SARAH, reproduces the optimal growth conditions of an experimental station: an improved cultivar is grown, plants are not nutrient-limited, plant density is high, and crop management (against weeds, diseases and pests) is optimal. Thus, final

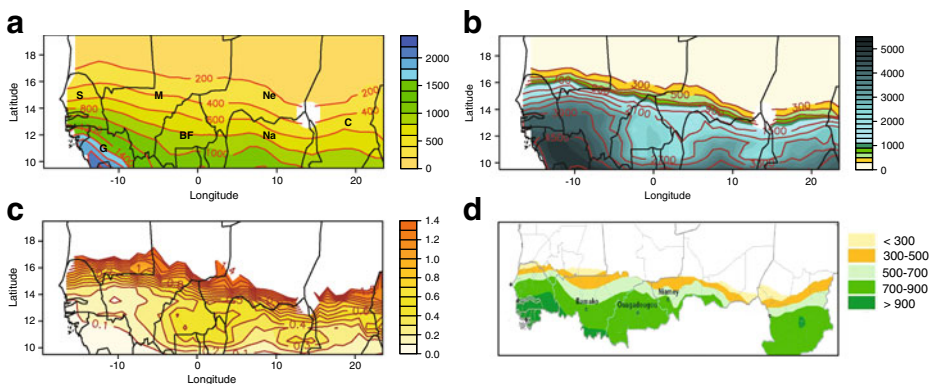


Fig. 6 **a** Mean annual rainfall (in mm) over 1965–2000, from the NCC data (*letters* indicate countries: S Senegal, M Mali, Ne Niger, Na Nigeria, C Chad, G Guinea, BF Burkina-Faso). **b** Average yield computed by ORCH-mil over 1971–2000, in kg/ha, for the 90-day variety. **c** Variation coefficient (standard deviation/mean) of simulated yields. **d** Average millet yields over 1971–2000, as given by Agrhymet, in kg/ha (*colours* correspond with **b**)

Table 2 Mean and standard deviation of nationally aggregated modelled yields and FAO yields (in tons of dry matter per hectare, tDM/ha)

	Mean		Standard deviation	
	FAO	ORCH-mil	FAO	ORCH-mil
Mali	0.67	2.81	0.12	0.35
Niger	0.36	1.38	0.06	0.57
Burkina-Faso	0.48	2.53	0.12	0.53
Senegal	0.51	3.1	0.11	0.38
Chad	0.45	2.46	0.08	0.41

yields can be considered as weather-dependant maximum attainable yields under rainfed conditions. As shown in Section 3.3, such yields reach 2–3 t/ha at the BNRS (around 100 gC/m²); Murty et al. (2007) report similar values for millet and sorghum on experimental stations in India. Accordingly, ORCH-mil’s simulated yields are of the same magnitude. However, many factors contribute to create a gap between such potential yields and actual on-farm yields: lack of fertilization and poor soil fertility, suboptimal management, pests, etc. Plants are also more sparsely sowed (given limitations on soil fertility, in particular), and instead of improved cultivars farmers most often grow local and traditional hardy varieties, which tend to be advantageously less sensitive to drought or climatic stress but yield a weaker production on average.

Because ORCH-mil does not account for all these yield-reducing factors, it unsurprisingly overestimates average observed yields. The fact that hardy cultivars are less sensitive to climate may also explain the overestimation of simulated yield interannual variability. Overestimating observed on-farm yields is a common short-fall in many crop modelling studies, for crop models are most often calibrated in controlled environments, not accounting for non-climatic factors. Other large-scale analysis in similar studies face similar issues: for groundnuts in India using the GLAM model, Challinor et al. (2004, 2005) define an empirical yield gap parameter to reduce simulated yields from climatic potential yields to average observed yields. In LPJ-ml, Bondeau et al. (2007) adjust the “maximum LAI” parameter to account for the different levels of crop management intensities across the world. In our case, some of the factors contributing to lower on-farm yields will in the future be accounted for in the frame of ORCHIDEE: lower plant densities can be simulated by prescribing higher bare soil fractions within the grid cell; the latest version of ORCHIDEE includes a representation of the nitrogen cycle and an explicit computation of nitrogen stresses (Zaehle and Friend 2010); finally, a new version of SARRAH is being calibrated for more traditional farmers’ millet cultivars, and could be straightforwardly implemented into ORCH-mil.

In the present paper, the assumption we make is that this positive mean bias in crop production is relatively constant from year to year, and thus that the simulated (climate-driven) yield variability can still be compared to the observed variability.

4.2 Interannual variability of simulated and observed yields

In this section we focus on testing the ability of ORCH-mil to simulate the inter-annual variability of millet yields. This implies to assess how consistent the model is with the observed climate–yield relationship, and how it reproduces the observed

yield interannual variability, not in absolute terms (as we showed in the previous section that it was overestimated in ORCH-mil) but in terms of standardized anomalies.

4.2.1 Correlations between climate and yields

In the context of rain-fed agriculture in semi-arid countries, cumulative rainfall can be expected to be the main driving climatic variable for crop production. Thus, in order to compare the first-order relationship between climate and yield in the observations and in the simulations, we compute the correlations over 1965–2000, at the national scale, between annual cumulative rainfall from the NCC dataset (which, as indicated in Section 2.3, is corrected by CRU values) and, respectively, observed and simulated yields. As indicated in Section 2.4, both yield (simulated and observed) and climate time series are detrended, as we are only interested here in inter-annual variability. The same analysis was carried out with other climatic variables (temperature, incident short-wave radiation) but did not give any significant results (not shown).

Table 3 shows the results for FAO yields. These correlations can be considered as a first-order “climate signal” in the observations. As expected, significant correlations appear: around 0.6 for Niger and Burkina-Faso, around 0.5 for Senegal and Chad (for 36-year time series, correlations above 0.33 are significant at the 5% level). Correlation for Mali surprisingly remains non significant ($R = 0.26$). However, as explained before (see Section 2.4), the accuracy of the FAO data must be considered carefully. In particular, the relationship between national yield and rainfall is not stationary for Mali and Senegal: correlations over 1965–1984 are respectively 0.58 and 0.6 (figures in brackets in Table 3), and fall to 0 for both countries over 1985–2000. Since there is no particular reason to believe that rainfall amounts from the CRU—which are used to correct the monthly rainfall amounts in the NCC dataset—became particularly wrong after 1984, nor that there was at that time in these countries a sudden increase in the irrigated fraction of staple crops—or other farming practices that can reduce the dependence of crop production on rainfall—this non-stationarity potentially highlights a discontinuity in census data from the FAO, rather than an actual change in the weather–yield relationship.

Correlations calculated from the ORCH-mil simulations of 90-day and 120-day millets (Table 4) are overall stronger than in reality, suggesting that the model overestimates the role of rainfall in crop production. In the simulations, rainfall is one of the few input variables to the model, whereas it is one of many in reality: other non-climatic factors also impact crop productivity, such as human management, soil fertility, biotic stresses, etc. Thus, an overestimation of the relationship between yield

Table 3 Correlations between FAO national yields and annual rainfall (from the NCC data, aggregated over each country)

Mali	0.34 (0.61)
Niger	0.64
Burkina-Faso	0.58
Senegal	0.49 (0.6)
Chad	0.49

Figures in brackets for Mali and Senegal indicate the correlation over 1965–1984

Table 4 Correlations between simulated yields and annual rainfall, aggregated over each country; first column is for the 90-day cycle simulation, second column for the 120-day cycle simulation

	90-day cycle	120-day cycle
Mali	0.63	0.73
Niger	0.81	0.72
Burkina-Faso	0.09	0.58
Senegal	0.72	0.64
Chad	0.86	0.56

and rainfall can be expected in the model, as has been noted in other modelling studies (for instance, Challinor et al. 2005).

The correlation between rainfall and simulated yield in Mali and Burkina Faso are stronger with the 120-day cultivar (respectively $R = 0.73$ and $R = 0.58$ for Mali and Burkina Faso) than with the 90-day cultivar. This can be explained by the southern extension of these two countries (compared to Senegal or Niger) that experience longer rainy seasons. These higher correlations suggest, as expected, that a longer cycle duration is more realistic in these countries, and that there is a need to differentiate millet varieties in West Africa in terms of cycle duration. In the following sub-section, we will consider for each country the most appropriate variety in our simulation (120-day for Mali and Burkina-Faso, 90-day for Niger, Mali, Chad and Senegal).

4.2.2 Correlations between simulated and observed yields

Correlations between observed and simulated yield are reported in Table 5; they are overall moderate. The highest correlation is obtained for Burkina-Faso and Niger ($R = 0.53$ and 0.47 , respectively). Figure 7 shows that for these countries the model is, to a certain extent, able to reproduce some of the year-to-year variability of FAO yields. Table 3 suggest that this skill mainly results from these two countries showing the strongest climate signal in observations ($R = 0.58$ and 0.64 , respectively). For Senegal, the correlation between observed and simulated yields significantly falls, as expected, from 0.49 over 1965–1984 to -0.03 for the rest of the period, which is consistent with the absence of climatic signal in the FAO yields after 1984. For Mali the correlation remains non-significant whatever the time period. This suggests a specific problem in the simulations over the Mali region. Finally, the correlation for Chad remains barely significant ($R = 0.32$), although this country seemed similar to Niger: millet cultivation areas are in dry northern latitudes (Fig. 4), and thus simulated yields show a strong rainfall dependency ($R = 0.86$, Table 4). Unlike Niger,

Table 5 Correlations between nationally aggregated modelled yields and FAO yields, over 1965–2000 (1965–1984)

Mali	0.15 (0.29)
Niger	0.47
Burkina-Faso	0.53
Senegal	0.29 (0.48)
Chad	0.32

Figures in brackets for Mali and Senegal indicate the correlation over 1965–1984. Figures in bold are significant at the 5% level

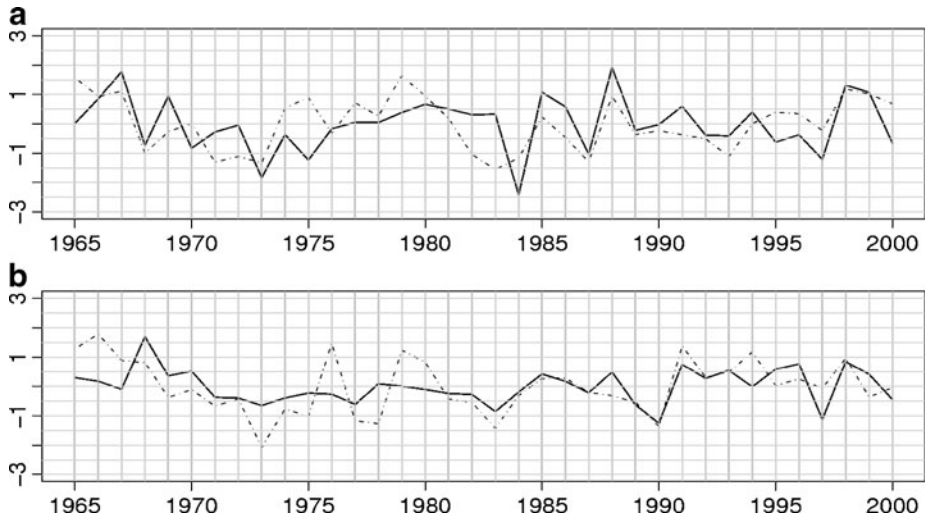


Fig. 7 Simulated (*dashed line*) and observed (*full line*) national yields for **a** Niger, **b** Burkina-Faso. **a** shows results for the 90-day crop cycle simulation, **b** results for the 120-day crop cycle simulation. Values are given in standardized anomalies: $(x - \text{mean}(x))/\text{std}(x)$

however, Chad shows a weak climate signal across the whole time period ($R = 0.49$, Table 3), so that simulated yields correlate poorly to observations.

Several general reasons can be pointed out to explain the modest model skill. First, any model is by nature imperfect: some processes might be inadequately represented, or even missing, in ORCH-mil, hampering its ability to capture the observed yield variability. Second, potential biases in the forcing data may also translate into biases in the simulation. In particular, if rainfall monthly amounts in the NCC dataset are corrected by the CRU data, the intraseasonal distribution ultimately relies only on the NCEP reanalysis, and thus can be questioned. Uncertainties also arise from the historical distribution of millet croplands: the assumption of a constant general pattern of millet areas over recent decades might be inappropriate. Finally, as previously mentioned in Section 2.4, we also underscore that observed yields are influenced by many non-climatic factors, whereas climate is the only driver of modelled yields: therefore, there is also an upper limit to the skill of any climate-only driven model at simulating national yields.

These limitations result in the correlations between observed and simulated yields remaining weaker than the correlations between observed yields and rainfall (Tables 3 and 5). Although this might suggest that cumulative rainfall is overall a better predictor of large-scale yields, one has to keep in mind that statistical relationships do not resolve biophysical processes, and therefore may not perform well under changing climates and changing environments. For example, climate/vegetation relationships do not account for the effects of future increased atmospheric CO_2 levels. Process-based modelling also allows accounting for the impacts of intraseasonal weather variability—provided it is well represented in the forcing data, and is significant enough to have a detectable impact on large-scale yield variability.

5 Modifications of surface properties and fluxes

In this section, we compare on a regional scale ORCH-mil with the standard version of ORCHIDEE in terms of land surface properties. Indeed, by including in ORCHIDEE a more realistic representation of croplands, we also modified some of the land surface biophysical properties (e.g. albedo, roughness length) and land-atmosphere fluxes: absorbed and emitted radiation, water and heat fluxes. Given that the seasonal cycle of phenology is improved in ORCH-mil, these variables can be expected to be more realistically simulated as well. Hence, we aim here at quantifying the differences we introduced in terms of surface energy budget, in order to get a first taste of how accounting explicitly for croplands in a biosphere model might feed back on the monsoon climatic system.

We run the same simulation as described in the previous section, but with the standard version of ORCHIDEE. As mentioned in the introduction, the C4 crop-PFT in this version is simulated as natural grassland with enhanced photosynthetic activity. This simulation is compared to the 90-day simulation by ORCH-mil presented in the previous section. In this section, because we are interested in the absolute differences between ORCH-mil and ORCHIDEE rather than in a comparison to observed data, we do not use the millet area map as in Section 4: we compare ORCH-mil and ORCHIDEE over the whole simulation domain.

Figure 8 shows the ratio, between ORCH-mil and ORCHIDEE, for the mean (over 1965–2000) annual net radiation, albedo, latent and sensible heat fluxes. One can see that, on average, net radiation (the energy available at the surface) is lower in ORCH-mil (Fig. 8a). This means that less energy will be returned to the atmosphere in the form of latent and sensible heat. This is consistent with the higher albedo in ORCH-mil (Fig. 8b); however, one can see that if the mean annual latent heat flux is indeed reduced (Fig. 8c) (in some regions by more than 25%), in the mean time the sensible heat flux slightly increases (Fig. 8d) and the sum of those changes exceeds the change in absorbed solar radiation. Hence, it is not possible

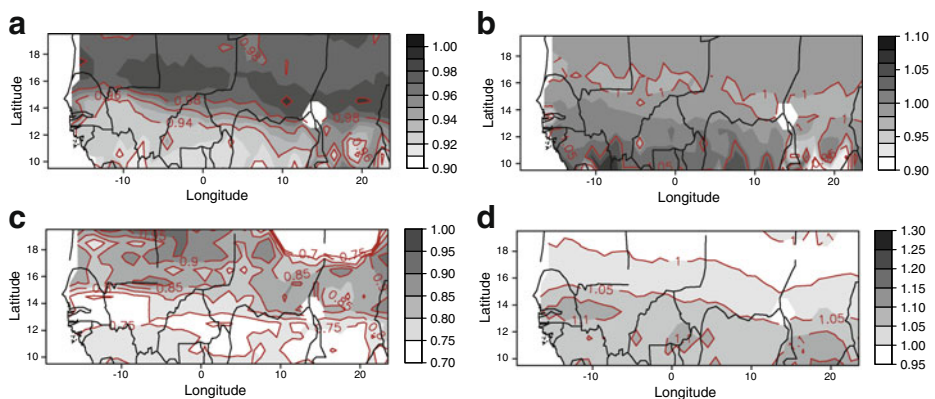


Fig. 8 Ratio between ORCH-mil and ORCHIDEE for 36-year average of annual value of **a** net radiation, **b** albedo, **c** latent heat flux, **d** sensible heat flux

to attribute this reduction in net radiation solely to the higher albedo in the crop simulation.

To further analyse these differences, the mean seasonal cycle of those same variables are illustrated on Fig. 9, averaged over the 36 years of simulation and for a small regional window (2°W : 7°E – 12° : 14°N) corresponding to a domain with large differences in latent heat flux (Fig. 8c). One can see that the plant cycle is on average shorter in ORCH-mil (upper-left graph, LAI in dots): as discussed in Section 3, this is because ORCHIDEE simulates croplands as natural grasslands that gradually decline throughout fall and winter, whereas in ORCH-mil the phenological cycle is shorter and abruptly ends with a harvest at the end of the rainy season (since several years and pixels are averaged, the abrupt harvest is here averaged to a more gradual decline). It also shows that the average maximum LAI is reduced in ORCH-mil, from 4 in ORCHIDEE to a more realistic value of 2.

Because of the shorter vegetation cycle, evapotranspiration (latent heat flux) at the end of the growing season is, on average, reduced (same graph, solid lines). For the same reason, albedo (Fig. 9c) increases in ORCH-mil at the end of the year (the last 120 days): while in standard ORCHIDEE the senescence of grass's leaves is very slow, thus keeping bare soil shaded by vegetation, in ORCH-mil harvested cropland turns directly to bare soil, the albedo of which is larger than grass in this region. This higher albedo results in a lower net radiation (Fig. 9d) and thus the increase in sensible heat flux (Fig. 9b) only partially offsets, on average, the decrease in latent heat flux resulting from the plant being harvested. This increase in sensible heat flux, however, implies a higher soil temperature, up to 4 K hotter (Fig. 9f).

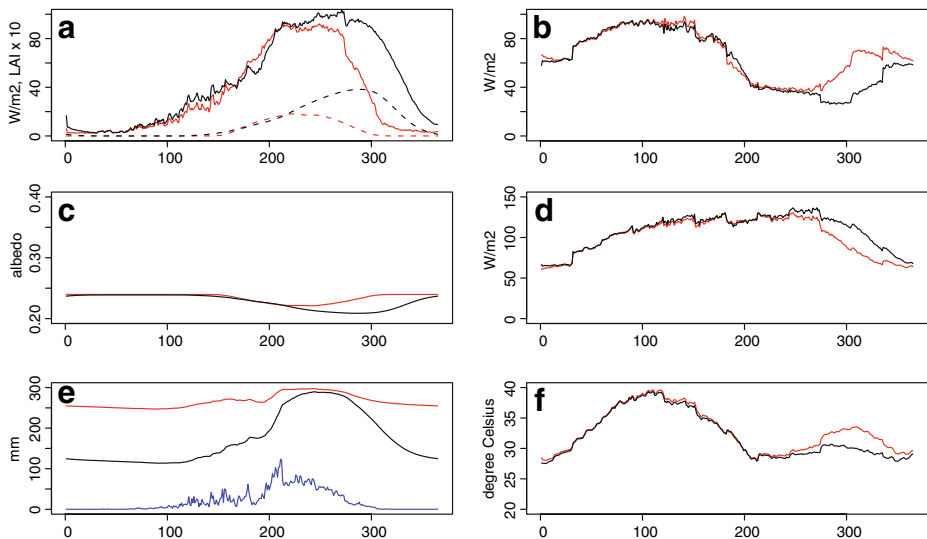


Fig. 9 Mean annual cycle, over the 36 years of simulation and a 2°W – 7°E / 12° – 14°N window, for ORCH-mil (red) and ORCHIDEE (black), for **a** latent heat flux (full lines) and LAI, scaled up by a factor 10 (dashed lines), **b** sensible heat flux, **c** albedo, **d** net radiation, **e** total soil water content, and rainfall (blue line) scaled up a factor 10, **f** soil temperature

The shortening of the vegetation's cycle also causes some modifications in the soil water budget: as less water is evaporated at the end of the rainy season (since the crop is harvested), more water remains in the soil and is available during the dry season of the following year. Thus, on average total soil water content along the year is increased in ORCH-mil compared to standard ORCHIDEE (Fig. 9e). While this effect may be qualitatively realistic, its magnitude in the model is certainly questionable.

In summary, the differences in surface energy budget between ORCH-mil and ORCHIDEE mainly result from the differences in cycle duration (as shown on Fig. 9). This explains the latitudinal gradient of changes that appears on Fig. 8: these differences in cycle length between natural grasses and fixed-duration millet widen with decreasing latitudes. As we only considered the 90-day simulation of ORCH-mil, in which crop cycle length is too short in the south of the simulation domain (see previous section), one may expect these differences in energy budget at low latitudes to be overestimated. However, the same plots with the 120-day variety produce a similar general pattern with only slightly lower differences: for instance a maximum latent heat flux reduction of 20 % instead of 25% (not shown).

If we try to extrapolate from our off-line (decoupled from an atmospheric general circulation model) results and put them in the context of the dynamics of the monsoon system, we can hardly expect any change regarding the onset of the monsoon rains. Indeed, under a tropical monsoon climate, with only one short rainy season and thus one growing season for vegetation, the phenology of croplands and natural grasslands does not differ much. In the region considered here, natural vegetation growth starts as soon as the rainy season begins, and farmers generally try to sow as early as possible: thus, the beginning of the seasonal cycle of natural and cultivated vegetation tends to be synchronous. The largest differences will be obtained at the end of the rainy season, when crops are harvested, unlike grasslands that continue to cover the ground. As a consequence, accounting explicitly for croplands across West Africa in a coupled biosphere/atmosphere model would probably influence the retreat of the monsoon rains rather than their initiation. But this deserves further investigation since the question of the interannual memory of the monsoon system via land surface mechanisms—that is, the influence of conditions at the end of season 'n' on the conditions at the beginning of season 'n + 1'—remains open (Philippon and Fontaine 2002; Douville et al. 2006; Fontaine et al. 2007). The largest amount of soil moisture that remains in the soil when crops are planted instead of supergrassland could very well influence the energy budget at the start of the following monsoon season.

Naturally, these modifications here result from an idealized experiment where a 100% grassland land-cover is replaced by a 100% cropland land-cover. These modifications have to be weighted by the crop land-cover fraction: Fig. 4 indicates that this will on average significantly scale down the impacts over the whole region. However, it also shows that crops can locally represent a dominant part of the landscape (the maximum millet fraction on a 5' × 5' pixel is 67.5%). Since meso-scale seasonal variability in surface fluxes and soil moisture has the potential to feed back on atmospheric circulations and rainfall (Taylor et al. 2007; Taylor 2008), the differences between grasslands and croplands we highlighted may have local impacts on atmospheric conditions. Moreover, present-day land-use intensity is likely to increase in coming decades, as the expected increase in population will inevitably

require expanding cultivated areas, in addition to increasing yield (according to Griffon 2006 (p.153), food production in Africa will have to quintuple between 2000 and 2050). Thus, more realistically accounting for croplands across West Africa may be an essential step to study the future of the West African Monsoon in a coupled biosphere/atmosphere model.

6 Conclusion and outlooks

It has been suggested that a relevant framework to address the twofold issue of crops–climate interactions (the effect of climate on crops as well as the feedback of croplands on climate) may be the extension of global vegetation models, coupled to climate models, in order to include a better representation of croplands. Here, by introducing into the land surface model ORCHIDEE processes and parameterisations taken from an existing crop model calibrated over West Africa, we develop an original model for tropical crops, which is a first step towards such an integrated crop–climate model.

In terms of crop and yield simulation, it realistically simulates growth and development of millet on an experimental station in Senegal. When applied over West Africa, the spatial distribution of simulated sowing dates and yields is realistic. However, when assessed against national FAO data, yields mean values and variability are largely overestimated. This mainly results from running a single highly-productive, nutrient-unlimited and intensely-managed crop-type parameterisation across the whole simulation domain. The model shows a spatio-temporal dependence of millet yields on rainfall that is broadly consistent with observations. The model, as expected, somehow overestimates the large-scale climate signal (defined as the correlation at national scale between rainfall and yields): across several countries, correlations range from 0.39 to 0.64 in observations and from 0.58 to 0.86 in simulations. The model skill, e.g. its ability to reproduce the observed time series of yield anomalies, remains moderate: the best correlations are 0.53 for Burkina-Faso, 0.47 for Niger. Since simulated yields are highly rainfall-dependent, both spatially and temporally, the model skill is generally greater where the climate signal in the observations is stronger. Accounting for different millet varieties in terms of cycle duration substantially improved our results in certain countries.

In terms of land surface properties, we compared ORCH-mil with the standard version of ORCHIDEE, which represents croplands as natural grasslands. The main difference resulting from an improved representation of croplands is the shorter plant cycle, because croplands are harvested and replaced by bare soil. Thus, explicitly accounting for croplands results, on average, in modifications of the surface energy budget during the second half of the rainy season: evapotranspiration is reduced (by as much as 25% locally across part of the sahelian domain), sensible heat flux increases. Since albedo increases as well, net radiation is reduced, meaning that less energy is in the end returned to the atmosphere. In terms of water budget, the reduced evaporation also leads to higher water content in the soil at the end of the crop growing season. The effects on the atmosphere of such modifications of the surface budgets (water, energy) should be investigated by coupling ORCH-mil to an AGCM.

The development of ORCH-mil and the results shown in this paper are a first step to study crops–climate interactions. Further work is needed to improve the accuracy of the model, in particular in terms of yield simulation.

First, it would be necessary to test ORCH-mil on other locations where in situ measurements are available, in order to better assess the robustness of the model, and its ability to capture the impacts of climate variability. In order to reduce the average gap between observed and simulated average yields, the model should account for the differences between the intensive growth conditions it simulates and the more extensive on-farm growth conditions. This could be done empirically by modifying some parameters in the model as a proxy to different level of crop management intensity, or by *a posteriori* calibrating a large-scale “yield gap” parameter. A more satisfying approach would be to explicitly model some of these yield-reducing factors, for example the effect of insufficient fertilization by using the new ORCHIDEE-CN version which includes the N cycle.

Simulations at the regional scale, then, need to more consistently account for the spatial heterogeneity in crop varieties, particularly in terms of crop duration, as highlighted in this study: for example through a parameterisation of the crop cycle length as a function of the sowing date.

Overall, including croplands in a DGVM may offer a consistent framework for integrated crop–climate interactions studies. However, in our case the exact extent to which such a model can be used as an efficient large-scale predictor for crop production still needs to be demonstrated: multiple uncertainties arise from the mismatch between the simplicity of a single large-scale model simulation and the complexity and diversity of local agronomical situations. On the other hand, such a model is interesting to analyse the large-scale feedbacks of crops to climate: biophysical effects, like changes in water and momentum fluxes, or biogeochemical effects, like modifications in the vegetation carbon budget. In the case of West Africa, this could contribute to analyze the potential impacts of agricultural land-use on land–atmosphere interactions, and on the West African Monsoon system. Further development is naturally needed in order to extend this modelling approach to other regions of the world, and other crops.

Acknowledgements We would like to gratefully acknowledge Christian Baron and the Ecotrop Team at CIRAD (French Agricultural Research Centre for Agricultural Development) for providing us with the SARRAH model and with the Bambey experimental station data, as well as for their useful advice and comments on the work presented here. We also gratefully thank Seydou Traoré and the Agrhymet Centre in Niamey for providing us with maps of millet sowing dates and yields. We thank the three anonymous reviewers for their useful comments and suggestions. Alexis Berg is supported by the Region Ile-de-France PhD-funding program.

References

- Affholder F (1997) Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Res* 52:79–93
- Ati OF, Stigter CJ, Oladipo EO (2002) A comparison of methods to determine the onset of the growing season in northern Nigeria. *Int J Climatol* 22:731–742
- Baron C, Reyniers FN, Clopes A, Forest F (1999) Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agriculture et Développement* 24:89–97

- Baron C, Sultan B, Balme M et al (2005) From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. *Phil Trans R Soc B: Biol Sci* 360:2095–2108
- Betts R (2005) Integrated approaches to climate-crop modelling: needs and challenges. *Phil Trans R Soc B: Biol Sci* 360:2049–2065
- Bondeau A, Smith PC, Zaehle S et al (2007) Modelling the role of agriculture for the 20th century carbon balance. *Glob Chang Biol* 13:679–706
- Boucher O, Myhre G, Myhre A (2004) Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Clim Dyn* 22:597–603
- Brisson N, Gary C, Justes E et al (2003) An overview of the crop model STICS. *Eur J Agron* 18: 309–332
- Challinor AJ, Slingo JM, Wheeler TR et al (2003) Toward a combined seasonal weather and crop productivity forecasting system: determination of the working spatial scale. *J Appl Meteorol* 42:175–192
- Challinor AJ, Wheeler T, Craufurd PQ et al (2004) Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agric For Meteorol* 124:99–120
- Challinor AJ, Wheeler T, Craufurd PQ et al (2005) Simulation of crop yields using ERA-40: limits to skill and nonstationarity in weather–yield relationships. *J Appl Meteorol* 44:516–531
- Ciais P, Reischstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J et al (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437(7058):529–533
- Collatz GJ, Ribas-Carbo M, Berry JA (1992) Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust J Plant Physiol* 19:519–538
- de Noblet-Ducoudré N, Gervois S, Ciais P et al (2004) Coupling the soil–vegetation–atmosphere–transfer scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie* 24:1–11
- de Rosnay P, Polcher J (1998) Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrol Earth Syst Sci* 2:239–256
- de Rosnay P, Polcher J, Laval K, Sabre M (2003) Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over Indian Peninsula. *Geophys Res Lett* 30(19). doi:[10.1029/2003GL018024](https://doi.org/10.1029/2003GL018024)
- de Rosnay P, Drusch M, Boone A, Balsamo G, Decharme B, Harris P, Kerr Y, Pellarin T, Polcher J, Wigneron J-P (2009) The AMMA Land Surface Model Intercomparison Experiment coupled to the Community Microwave Emission Model: ALMIP-MEM. *J Geophys Res* 114. doi:[10.1029/2008JD010724](https://doi.org/10.1029/2008JD010724)
- Dingkuhn M, Baron C, Bonnal V, Maraun F, Sarr B, Sultan B, Clopes A, Forest F (2003) Decision-support tools for rain-fed crops in the Sahel at the plot and regional scale. In: Struif-Bontkes TE, Wopereis MCS (eds) A practical guide to decision-support tools for agricultural productivity and soil fertility enhancement in Sub-Saharan Africa. IFDC, CTA, pp 127–139
- Donner SD, Kucharik CJ (2003) Evaluating the impacts of land management and climate variability on crop production and nitrate export across the upper Mississippi Basin. *Glob Biogeochem Cycles* 17:1085
- Douville H, Conil S, Tyteca S, Voldoire A (2006) Soil moisture memory and West African monsoon predictability: artefact or reality? *Clim Dyn* 28:723–742
- Ducoudré N, Laval K, Perrier A (1993) SECHIBA, a new set of parameterisations of the hydrologic exchanges at the land–atmosphere interfaces within the LMD atmospheric general circulation model. *J Clim* 6:248–273
- Dyson T (2001) World food trends: a Neo-Malthusian prospect? *Proc Am Philos Soc* 145(4): 438–455
- Feddema JJ, Oleson KW, Bonan GB et al (2005) A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncertainty in present-day land-cover representations. *Clim Dyn* 25:581–609
- Foley JA, Prentice IC, Ramankutty N et al (1996) An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Glob Biogeochem Cycles* 10: 603–628
- Foley JA, Coe MT, Scheffer M et al (2003) Regime shifts in the Sahara and Sahel: interactions between ecological and climatic systems in Northern Africa. *Ecosystems* 6:524–532
- Foley JA, DeFries RS, Asner GP et al (2005) Global consequences of land use. *Science* 309:570–574
- Fontaine B, Louvet S, Roucou P (2007) Fluctuations in annual cycles and inter-seasonal memory in West Africa: rainfall, soil moisture and heat fluxes. *Theor Appl Climatol* 88:57–70
- Gervois S, de Noblet-Ducoudré N, Viovy N et al (2004) Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interact* 8:1–25

- Giannini A, Saravanan R, Chang P (2003) Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science* 302:1027–1030
- Graef F, Haigis J (2001) Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and effects on farmers' management strategies. *J Arid Environ* 48/2:221–231
- Griffon M (2006) *Nourrir la planète*. Ed. Odile Jacob, Paris
- Hansen JW (2002) Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agric Syst* 74:309–330
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N et al (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere–biosphere system. *Glob Biogeochem Cycles* 19:GB1015. doi:[10.1029/2003GB002199](https://doi.org/10.1029/2003GB002199)
- Kucharik CJ, Brye KR (2003) Integrated biosphere simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. *J Environ Qual* 32: 247–268
- Monfreda C, Ramankutty N, Foley JA (2008) Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Glob Biogeochem Cycles* 22:GB1022. doi:[10.1029/2007GB002947](https://doi.org/10.1029/2007GB002947)
- Murty MVR, Piara Singh, Wani SP, Khairwal IS, Srinivas K (2007) Yield gap analysis of Sorghum and Pearl Millet in India using simulation modelling. Global theme on agroecosystems report no. 37. Patancheru 502 324, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India, 82 pp
- New M, Hulme M, Jones P (1999) Representing twentieth-century space–time climate variability. Part I: development of a 1961–90 mean monthly terrestrial climatology. *J Climate* 12:829–856
- New M, Hulme M, Jones P (2000) Representing twentieth-century space–time climate variability. Part II: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J Climate* 13:2217–2238
- Ngo-duc T, Polcher J, Laval K (2005) A 53-year forcing data set for land surface models. *J Geophys Res* 110:DO6116. doi:[10.1029/2004JD005434](https://doi.org/10.1029/2004JD005434)
- Ogallo LA, Boulahya MS, Keane T (2000) Applications of seasonal to interannual climate prediction in agricultural planning and operations. *Agric For Meteorol* 103:159–166
- Oram PA (1989) Sensitivity of agricultural production to climatic change, an update. In: *Climate and food security*. IRRI, Manila, Philippines, pp 25–44
- Osborne T, Lawrence D, Challinor AJ et al (2007) Development and assessment of a coupled crop-climate model. *Global Chang Biol* 13:169–183
- Penning de Vries FWT, Jansen DM, ten Berge HFM, Bakema A (1989) Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. PUDOC, Wageningen, The Netherlands, pp 291
- Philippon N, Fontaine B (2002) The relationship between the Sahelian and previous 2nd Guinean rainy seasons: a monsoon regulation by soil wetness? *Ann Geophys* 20:575–582
- Pielke RA Sr, Adegoke JO, Chase TN et al (2007) A new paradigm for assessing the role of agriculture in the climate system and in climate change. *Agric For Meteorol* 142:234–254
- Ramankutty N (2004) Croplands in West Africa: a geographically explicit dataset for use in models. *Earth Interact*, 8-023
- Ramankutty N, Evan AT, Monfreda C, Foley JA (2008) Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Glob Biogeochem Cycles* 22:GB1003. doi:[10.1029/2007GB002952](https://doi.org/10.1029/2007GB002952)
- Ruimy A, Dedieu G, Saugier B (1996) TURC: a diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. *Glob Biogeochem Cycles* 10:269–285
- Samba A (1998) Les logiciels Dhc de diagnostic hydrique des cultures: prévision des rendements de mil en zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest. *Sécheresse* 9:281–288
- Samba A, Sarr B, Baron C, Gozé E, Maraun F, Clerget B, Dingkuhn M (2001) La prévision agricole à l'échelle du Sahel. In: Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M (eds) *Modélisation des agro-écosystème et aide à la décision*. CIRAD and INRA, Montpellier, pp 243–262
- Scholze M, Bondeau A, Ewert F, Kucharik C, Priess J, Smith P (2005) Advances in large-scale crop modelling. *Eos Trans AGU* 86:245–247
- Sinclair TR, Mudchow RC (1999) Radiation use efficiency. *Adv Agron* 65:215–265
- Sitch S, Smith B, Prentice IC et al (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob Chang Biol* 9: 161–185
- Smith PC, de Noblet-Ducoudré N, Ciais P, Peylin P, Viovy N, Meurdesoif Y, Bondeau A (2010) European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: phenology and productivity. *J Geophys Res* 115:G01014. doi:[10.1029/2008JG000800](https://doi.org/10.1029/2008JG000800)

- Sultan B, Baron C, Dingkuhn M et al (2005) Agricultural impacts of large-scale variability of the West African Monsoon. *Agric For Meteorol* 128:93–110
- Taylor CM (2008) Intraseasonal land–atmosphere coupling in the West African Monsoon. *J Climate* 21:636–6648
- Taylor CM, Parker DJ, Harris P (2007) An observational case study of mesoscale atmospheric circulations induced by soil moisture. *Geophys Res Lett* 618(34):L15801
- Wang G, Eltahir EA (2000) Role of vegetation dynamics in enhancing the low-frequency variability of the Sahel rainfall. *Water Resour Res* 36:1013–1022
- Wang G, Eltahir EA, Foley JA, Pollard D, Levis S (2004) Decadal variability of rainfall in the Sahel: results from the coupled GENESIS–IBIS atmosphere–biosphere model. *Clim Dyn* 22:625–637
- Zaehle S, Friend AD (2010) Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates. *Glob Biogeochem Cycles* 24:GB1005. doi:[10.1029/2009GB003521](https://doi.org/10.1029/2009GB003521)
- Zheng X, Eltahir EA (1997) The response to deforestation and desertification in a model of West African monsoons. *Geophys Res Lett* 24(2):155–158
- Zheng X, Eltahir EA (1998) The role of vegetation in the dynamics of the West African Monsoons. *J Climate* 11:2078–2096

1.2 Discussion

Dans cette première section on s'est attaché à analyser la capacité du modèle à simuler les rendements, et leur variabilité, à grande échelle, dans la région ouest-africaine. On discute ici certaines limites de ces résultats.

a. Phénologie

En moyenne, la contrainte forte posée par l'occurrence et la durée de la saison des pluies dans cette région permet au modèle de simuler correctement la phénologie des cultures, notamment le démarrage du cycle, tel que l'illustre la figure 5 de l'article. Les données manquent pour évaluer cette phénologie à l'échelle interannuelle. Pour une telle évaluation, à grande échelle, on aurait pu suggérer d'utiliser des données satellites de végétation (par exemple sur des mesures de NDVI) pour comparer la phénologie simulée à l'échelle d'un pixel par ORCHIDEE et celle mesurée par satellite. C'est notamment ce qui a été fait pour ORCHIDEE-STICS sur l'Europe (Smith et al. 2010a). Cependant cette méthode nécessite de disposer d'une carte de végétation suffisamment proche de la réalité pour que le signal LAI simulé par ORCHIDEE au niveau d'un pixel, qui dépend de l'agrégation des PFTs et donc de la carte de végétation du modèle, puisse être comparé au signal LAI mesuré par le satellite sur ce pixel, qui voit, lui, la végétation « réelle ». Qui plus est, l'évaluation de la phénologie des zones cultivées selon une telle méthode ne peut se faire réellement que sur des pixels pour lesquels la proportion des zones cultivées est suffisamment importante (autrement, l'évaluation porte aussi sur d'autres types de végétation). Si ces deux conditions sont remplies pour l'étude sur l'Europe de Smith et al. (2010a), ce n'est pas le cas ici pour l'Afrique de l'Ouest : les cartes de distribution de types de végétation sur l'Afrique, et peut-être plus particulièrement sur l'Afrique de l'Ouest, restent a priori trop incertaines pour ce genre d'exercice. Ramankutty et al. (2004), par exemple, comparent différents produits satellites de classification de végétation sur l'Afrique de l'Ouest, et mettent en évidence des différences importantes entre les différents jeux de données. D'autre part les fractions de pixel dévolues à l'agriculture n'atteignent pas les mêmes valeurs que dans les bassins agricoles des pays développés (où elles peuvent dépasser 90%). Ce type d'évaluation de la phénologie par satellite n'a donc pas pu être conduit dans notre cas, et l'on s'est davantage focalisé sur l'analyse des rendements simulés.

b. Rendements moyens

On a vu que le rendement simulé, confronté aux données FAO ou aux données observées localement (données Agrhymet en Afrique de l'Ouest), apparaît en moyenne fortement surestimé. On a expliqué que, fondamentalement, cette surestimation résulte de la différence entre le rendement potentiel climatique simulé par le modèle – qui correspond au rendement potentiel climatique atteint en station expérimentale – et le rendement paysan réellement atteint : cette différence est le reflet d'une faible intensification des pratiques agricoles en Afrique de l'Ouest. Cette faible intensification se traduit notamment par une faible densité de semis, pratique qui intègre les contraintes de fertilité des sols et de disponibilité en eau : on peut considérer cette densité comme un « proxy » du degré d'intensification. Il est intéressant de relier ces résultats avec ceux du chapitre I, où l'on a montré qu'en prenant en compte ce facteur, i.e. en prescrivant une fraction de sol nu réaliste dans la simulation sur site de Wankama au Niger, cette surestimation du modèle était fortement réduite, et les ordres de grandeur de biomasse correctement simulés. C'est pourquoi il est suggéré dans l'article que pour simuler dans ORCHIDEE-mil, à l'échelle régionale, des valeurs moyennes de rendements plus réalistes, il faudrait par exemple pouvoir prescrire sur le domaine d'étude la

fraction de sol nu correspondante au sein de la fraction agricole, qui intégrerait le degré d'intensification des pratiques agricoles sur la zone considérée. Une telle paramétrisation n'est pas implémentée ici dans les simulations à grande échelle, car on ne dispose pas de cette information, et de ses variations spatiales, pour l'ensemble de la zone⁵. Elle reviendrait néanmoins à peu de choses près, en pratique, à diminuer proportionnellement, *a posteriori*, le rendement simulé par le modèle (par exemple une fraction de 10% reviendrait à diminuer le rendement de 10%). En se basant sur les résultats du chapitre I sur le site de Wankama, où la fraction de sol nu dans le champ était de 70%, on peut donc considérer que les rendements simulés par ORCHIDEE-mil seraient, en ordre de grandeur, diminués d'un facteur au moins 2 ou 3. La figure 2.1 et le tableau 2.1 ci-dessous reprennent pour illustration les résultats de l'article précédent dans le cas où on aurait prescrit une fraction de sol nu plus modeste de 50%. On constate que le biais entre rendements simulés et observés serait significativement réduit.

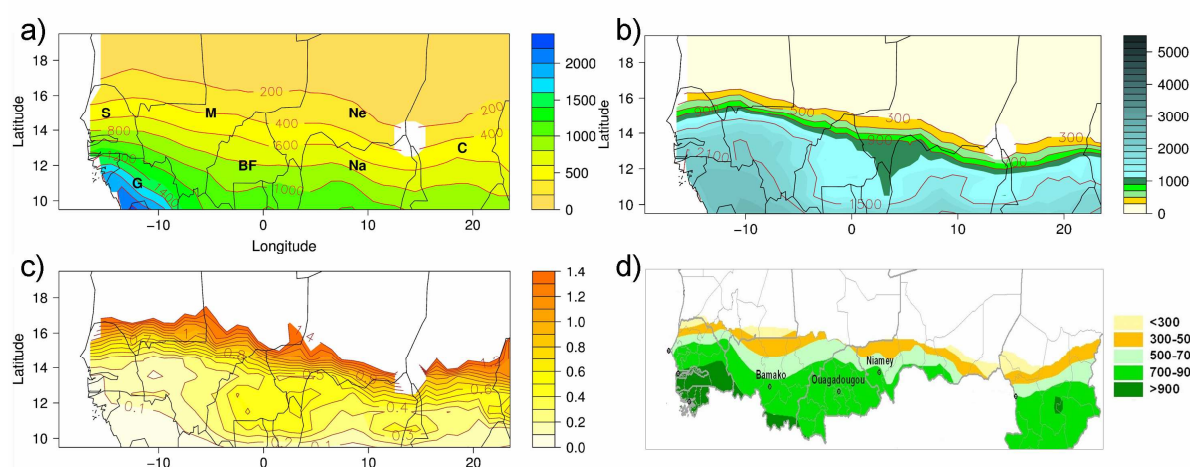


Fig.2.1 : même figure que la figure 6 de l'article de la section précédente – a) pluie moyenne sur 1965-2000, en mm/an, sur l'Afrique de l'Ouest, issue de NCC (N'go-Duc et al. 2005) ; b) rendements moyens simulés par ORCHIDEE-mil, en kg/ha, sur la même période, en utilisant une fraction de sol nu de 50% ; c) coefficient de variation des rendements simulés (écart-type/moyenne) ; d) rendements fournis par l'Aghrymet. Seul le panel b) a changé ici – la variabilité des rendements simulés (panel c) n'est pas modifiée par l'introduction du sol nu.

	Mean		Standard Deviation	
	FAO	ORCHIDEE-mil	FAO	ORCHIDEE-mil
Mali	0.74	1.41	0.13	0.18
Niger	0.4	0.69	0.06	0.29
Burkina-Faso	0.53	1.27	0.13	0.27
Senegal	0.56	1.55	0.12	0.19
Chad	0.49	1.23	0.09	0.21

Tab.2.1: Rendements moyens et écarts-types des rendements simulés par ORCHIDEE et donnés par la FAO pour les différents pays.

Un autre regard qu'on peut apporter sur cette différence entre rendement potentiel climatique simulé par le modèle agronomique et rendements réels obtenus en milieu paysan, est qu'elle

⁵ D'autre part, du point de vue du déroulement chronologique de la thèse, les simulations présentées dans l'article ont été réalisées (et le papier écrit) avant l'étude sur le site de Wankama présentée dans le chapitre I.

souligne la marge d'amélioration des rendements qui existe dans ces régions. Même en admettant que le rendement potentiel climatique simulé par le modèle souffre d'un biais positif important, et en considérant qu'il n'est en pratique pas possible, en conditions réelles, d'atteindre de façon systématique le rendement potentiel climatique, la différence entre les valeurs moyennes observées par la FAO et les valeurs potentielles simulées par des modèles comme ORCHIDEE-mil ou SARRAH (ou les valeurs mesurées en station expérimentales comme à Bambey au Sénégal, ou relevées par Murty et al. (2007) en Inde) est telle, qu'elle suggère un potentiel d'amélioration des rendements très important. L'importance de ce « yield gap » (pour utiliser l'expression anglophone consacrée) reflète le fait que la Révolution Verte du dernier demi-siècle, dans les pays en développement, a largement laissé l'Afrique de côté. Les raisons à cela sont complexes et multiples, et ne seront pas développées ici (le lecteur pourra se référer par exemple à Griffon 2006) ; toutefois il semble évident - ce sera souligné plus en détail dans le chapitre III - qu'utiliser ce potentiel d'amélioration des rendements (« to close the gap ») sera une composante essentielle de toute stratégie visant à assurer la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest dans les décennies à venir.

c. variabilité des rendements

En termes de variabilité des rendements simulés à grande échelle, l'analyse proposée dans l'article précédent suit l'approche présentée par Challinor et al. (2004), et porte sur deux points : la capacité du modèle à représenter les relations observées entre rendements et climat, et la capacité du modèle à directement simuler la variabilité des rendements d'origine climatique (i.e., en éliminant les tendances technologiques, ou non-climatiques). Sur le premier point, les résultats présentés ici suggèrent que le modèle simule correctement, dans les environnements considérés, la dépendance à la pluie, à la fois spatialement et temporellement. Bien que ce point puisse sembler assez trivial, étant donné, ici, la forte contrainte hydrique, représenter correctement les relations entre climat (forçage) et rendements (sortie) constitue en quelque sorte à une « macro-évaluation » nécessaire des processus du modèle. D'une façon générale – dans un cadre plus large que l'analyse des liens végétation/climat présentée dans cette thèse - s'assurer qu'un modèle réagit selon les bons processus et produit les « bonnes réponses pour les bonnes raisons » est en effet un souci de validation majeur – au-delà de la simple validation des sorties du modèle. Sur le second point, on a montré que le modèle est en général capable de simuler la variabilité observée des rendements avec un minimum de significativité, bien que le pourcentage de variance expliquée reste faible (autour de 25% dans le meilleur des cas, sur le Niger et le Burkina-Faso).

On peut s'interroger sur les raisons de cette performance relativement modeste, notamment au regard des performances d'autres expériences de modélisation agronomique à grande échelle : Challinor et al. (2004), par exemple, parviennent avec le modèle GLAM à expliquer 58 % de la variance observée des rendements d'arachide sur l'ensemble de l'Inde – c'est-à-dire obtiennent une corrélation entre rendements simulés et observés de 0.76 (sur une période plus courte toutefois, 1966-1990). Trois raisons au moins peuvent, *a priori*, être avancées pour expliquer les performances plus modestes d'ORCHIDEE-mil sur l'Afrique de l'Ouest : i) une déficience du modèle : le modèle ne représente pas correctement les processus d'impacts du climat sur la végétation ; ii) en amont, le forçage climatique utilisé dans ces simulations présente des biais importants, et ces erreurs se propagent à travers le modèle de végétation ; iii) en aval, les données FAO auxquelles on compare les simulations ne sont pas suffisamment précises, et/ou contiennent trop d'informations non-climatiques, qu'un modèle comme ORCHIDEE, uniquement piloté par le climat, ne pourra pas simuler.

La première hypothèse est bien sûr envisageable, mais en pratique peut difficilement être testée - il faudrait par exemple comparer les résultats avec ceux d'autres modèles, obtenus

dans les mêmes conditions sur la même région : à notre connaissance il n'existe pas, ici, de telles expériences. On peut néanmoins noter qu'une telle intercomparaison de modèles agronomiques présenterait un intérêt important, puisqu'elle permettrait d'aborder la question de l'incertitude due aux modèles agronomiques dans les études d'impacts climatiques – un point que n'abordent que rarement les études d'impact, réalisées en général avec un seul modèle.

L'hypothèse iii) est également difficilement testable : en particulier, il n'existe pas, à notre connaissance, d'autres bases de données fournissant des informations équivalentes à la FAO mais qui en soient indépendantes, et qui permettraient d'estimer la robustesse des données reportées sur l'Afrique de l'Ouest. Il est difficile d'évaluer objectivement la qualité des données FAO des différents pays – et il faut bien entendu se garder de vouloir trop facilement remettre en cause les données lorsque la comparaison aux simulations n'est pas, comme sur l'Afrique de l'Ouest, complètement favorable au modèle. Néanmoins un simple jugement qualitatif sur les capacités institutionnelles et administratives des différents pays à évaluer de façon stable et continue au cours du temps leurs statistiques agricoles – pour mesurer de manière précise la variabilité interannuelle des rendements – peut laisser planer un doute sur la qualité des données FAO en Afrique de l'Ouest – en particulier quand on considère plus généralement les données FAO sur l'ensemble des pays d'Afrique, telles qu'elles sont présentées plus loin dans ce chapitre (figure 2.12 de la section 5.1). Qui plus est, lorsqu'on calcule comme ici des corrélations sur peu de points (une trentaine d'années) entre simulations et observations, il suffit de peu d'erreurs dans les données observées pour significativement biaiser l'estimation de la performance du modèle. Dans ce contexte, l'idée est d'appliquer le modèle sur une autre région, similaire, mais pour laquelle la qualité des données FAO peut sembler mieux établie : dans la section 3 on appliquera donc le modèle sur l'Inde, nous inspirant en cela des études de Challinor et al. (2004).

Enfin l'hypothèse ii) sur les données de forçage sera abordée dans la section suivante. Les données NCC (Ngo-Duc et al. 2005) utilisées dans l'article précédent sont les réanalyses climatiques NCEP/NCAR corrigées des observations mensuelles du CRU. C'est le type de jeu de forçage le plus réaliste pour un modèle de surface global comme ORCHIDEE. Néanmoins, les données journalières y restent celles des réanalyses, et donc pour les pluies, celles du modèle de climat (les pluies n'étant pas assimilées dans ces réanalyses). On sait que les précipitations sont, d'une façon générale, mal simulées dans les modèles de climat (Randall et al. 2007); or on a vu que dans la région considérée, les pluies sont un des forçages déterminants pour la simulation des rendements. On peut noter que les bons résultats présentés par Challinor et al. (2004) sur l'Inde sont obtenus en forçant leur modèle avec des pluies journalières observées – et que les résultats se dégradent lorsque le modèle est forcé par des réanalyses climatiques (Challinor et al. 2005). Pour éclaircir l'hypothèse ii), on se propose donc d'étudier l'impact sur la performance du modèle, en termes de simulation de la variabilité des rendements, d'une correction de la représentation des pluies dans les données de forçage d'ORCHIDEE-mil. Pour étudier en détails la sensibilité du modèle à la qualité du forçage climatique (i.e., les pluies), plusieurs corrections successives sont progressivement appliquées – cette étude fait l'objet de la section suivante, à travers un papier publié dans *Geophysical Research Letters*.

2. “What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa?” *Geophysical Research Letters*

What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa?

Alexis Berg,^{1,2} Benjamin Sultan,¹ and Nathalie de Noblet-Ducoudré²

Received 10 December 2009; revised 26 January 2010; accepted 2 February 2010; published 6 March 2010.

[1] A large-scale crop model is forced by a range of climate datasets over West Africa to test the sensitivity of simulated yields to errors in input rainfall. The model skill, defined as the correlation between observed and simulated yield anomalies over 1968–1990 at the country scale, is used for assessment. We show that there are two essential rainfall features for the model to skillfully simulate interannual yield variability at the country scale: cumulative annual variability and frequency. At such a scale, providing additional information on intraseasonal variability, such as the chronology of rain events, does not improve the model skill. We suggest that such information is relevant at smaller spatial scales but is not spatially consistent enough to impact large-scale yield variability. **Citation:** Berg, A., B. Sultan, and N. de Noblet-Ducoudré (2010), What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa?, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L05405, doi:10.1029/2009GL041923.

1. Introduction

[2] Agriculture is considered as the most weather-dependant of human activities [Oram, 1989]. The interannual variability of crop yields often reflects the variability of weather conditions [Lobell and Field, 2007]. In the tropics in particular, fluctuations in climate can lead to severe socio-economic impacts in developing countries [Challinor et al., 2003].

[3] Improved climate prediction offers interesting potential benefits to agriculture: numerous studies have tried to link seasonal prediction outputs from global climate models (GCMs) to crop models, thus translating climate forecasts into seasonal crop predictions (for a review, see Hansen et al. [2006]). On longer time scales, combining GCMs and crop models also provides a tool to assess the impacts of future climate change on crop production [e.g., Jones and Thornton, 2003].

[4] However, such impact studies ultimately rely on the accuracy of climate input data. GCMs errors inevitably propagate through the combined climate/crop modelling system. In particular, GCMs show systematic biases in rainfall: precipitation patterns are often poorly represented, and rainfall temporal characteristics (frequency, intensity) are biased [Randall et al., 2007].

[5] This study aims at assessing the impact of such errors on the performance of yield prediction. We take West Africa as a case study, which well illustrates the dependence of crop production on climate variability (rainfall, in this case).

By progressively correcting model rainfall towards observations, we build successive climate datasets, which are used to drive a large-scale crop model. We analyse how the model skill responds to the quality of the rainfall forcing, and determine what features of rainfall are essential to the accuracy of yield prediction. The model skill is defined as the model ability to simulate the observed time series of yield anomalies at large (i.e., national) scale: only the issue of interannual variability is considered here.

2. Model, Data, and Experiment

2.1. ORCHIDEE-mil

[6] ORCHIDEE is the dynamic global vegetation model developed at IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace). When coupled to a climate model, it simulates water, carbon and energy exchanges between the land surface and the atmosphere, explicitly computing vegetation growth [Krinner et al., 2005]. It can also be forced by climate data, to assess the impact of climate on ecosystems.

[7] To account for global vegetation, ORCHIDEE in its standard version uses 10 natural Plant Functional Types (PFT), and two agricultural PFTs. While the standard version essentially approximates croplands by grasslands, a new version has recently been developed for tropical C4 crops (ORCHIDEE-mil) [Berg et al., 2010]. It includes some parameterizations and processes taken from the crop model SARRAH which is routinely used by agronomists over West Africa to simulate tropical cereals like millet and sorghum [Dingkuhn et al., 2003; Sultan et al., 2005].

2.2. Climate Datasets

2.2.1. Rainfall Datasets

[8] Since reanalysis products constitute the most accurate description of weather at the resolution of the GCM, using them as input to a crop model somehow provides an upper limit on the accuracy of the combined (climate and crop) modelling system [Challinor et al., 2005]. We thus use precipitation from the NCEP/NCAR reanalysis [Kistler et al., 2001] as an example of good model output; other products (e.g., ERA-40) could also have been used for such a purpose.

[9] As for rain observations, we use two datasets to span the uncertainty: CRU (Climate Research Unit) [New et al., 1999, 2000] and IRD (Institut de Recherche pour le Développement) data [Sultan and Janicot, 2000; Janicot and Sultan, 2001]. These two datasets are rain gauges measurements interpolated on $1^\circ \times 1^\circ$ grids, but CRU data are only monthly whereas IRD data are daily.

2.2.2. Construction of the Climate Forcing Datasets

[10] We design a range of $1^\circ \times 1^\circ$ forcing datasets for West Africa, in which rainfall is progressively corrected, from model rainfall to observations. Successive corrections

¹LOCEAN, IPSL, Paris, France.

²LSCE, IPSL, Gif-sur-Yvette, France.

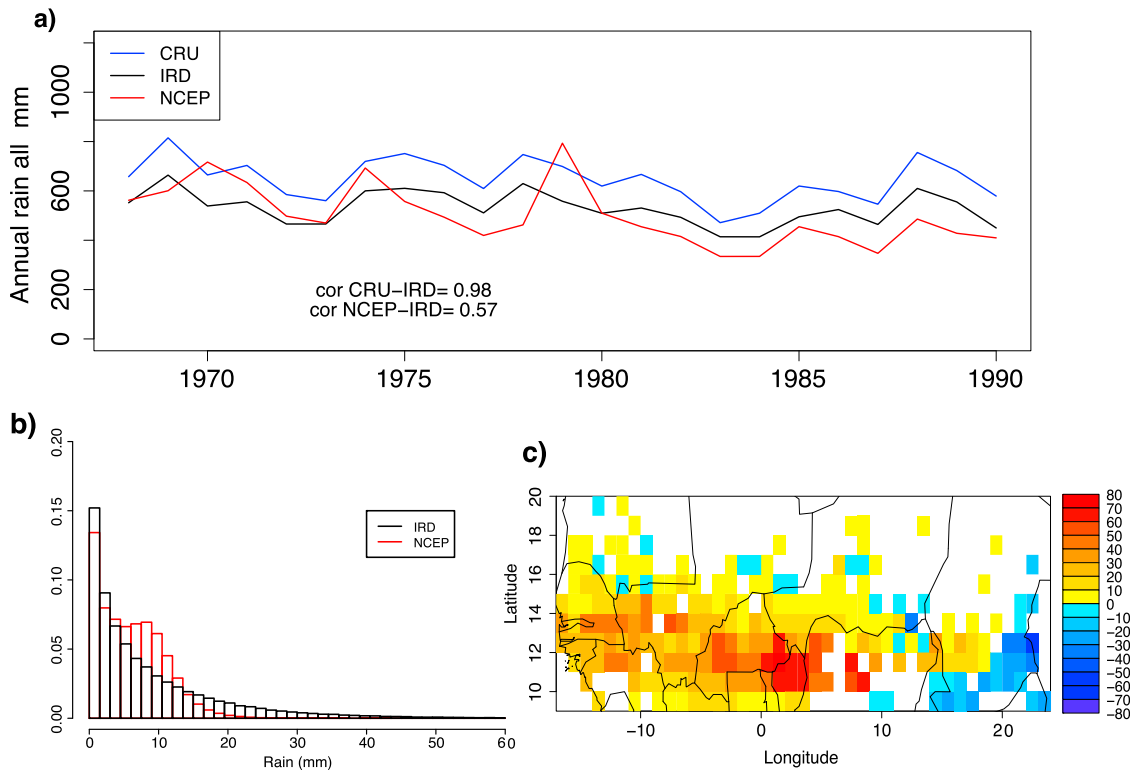


Figure 1. (a) Annual rainfall over 1968–1990, averaged over Mali, Niger Burkina-Faso and Senegal, from IRD, CRU and NCEP datasets. Figures give the correlation between CRU, or NCEP, and IRD. (b) Probabilistic distribution function for daily rainfall amounts from IRD (black) and NCEP (red) datasets, over the whole simulation domain. (c) Difference, in days, between average sowing dates over 1968–1990 in NCEP and IRD simulations (NCEP-IRD); white pixels are IRD missing data.

are applied to NCEP/NCAR rainfall in terms of annual cumulative rainfall, monthly cumulative rainfall, rain frequency. The following climate forcing datasets are built:

[11] 1. NCEP: rainfall is raw NCEP/NCAR rainfall, interpolated on $1^\circ \times 1^\circ$ grid cells [from *Ngo-Duc et al.*, 2005].

[12] 2. NCEP_AR: rainfall is NCEP/NCAR rainfall corrected by annual cumulative rainfall, either from IRD or from CRU. Each year, for each pixel, each rain event in NCEP/NCAR is scaled by the ratio (for that year) of annual rainfall in IRD (or CRU) to annual rainfall in NCEP/NCAR.

[13] 3. NCEP_MR: rainfall is NCEP/NCAR rainfall corrected by monthly cumulative rainfall, either from IRD or from CRU. Each year, each month, for each pixel, each rain event in NCEP/NCAR is corrected by the ratio of monthly rainfall in IRD (or CRU) to monthly rainfall in NCEP/NCAR.

[14] 4. FREQ: IRD daily events are used instead of NCEP/NCAR events; however, each month these events are randomly permuted, in order to lose the real timing of rain events but keep the observed frequency of rainfall. Rainfall is either monthly scaled to IRD monthly amounts or CRU amounts. Note that since total rainfall remains unchanged, the change in rain frequency also means a change in the daily amounts of rainfall.

[15] 5. OBS: IRD daily events are used, either as such, or scaled to CRU monthly amounts. OBS thus has the real frequency and timing of rainfall.

[16] These datasets differ only by their representation of rainfall: in all datasets, variables other than rainfall are NCEP/NCAR variables corrected by CRU data [*Ngo-Duc et*

al., 2005]. Limited by the spatial extension and time period of the IRD data, all these datasets cover a domain of 17°W – 20°E , 9°N – 20°N , over 1968–1990. The successive corrections applied to NCEP/NCAR rainfall are cumulative: for instance, NCEP_MR has the right monthly cycle and the right annual rainfall.

2.3. Simulations

[17] ORCHIDEE is run off-line over the selected domain, forced with each dataset (over 1968–1990), with a 30-year spin-up on the first year to initialize soil water content. Since we are interested in crop productivity alone, the prescribed vegetation map only includes croplands. Pixels are averaged over each country (below 16°N , the Sahara border) to derive a national simulated yield. Since some data is missing in the IRD rainfall dataset (pixels or years), a common mask is *a posteriori* applied to all simulations to allow comparing the different results. Thus, only the following countries are considered: Mali, Burkina-Faso, Senegal and Niger. National observed millet yields are taken from the FAO database (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Since in this study we are only interested in inter-annual variability, all time series (simulated and observed yields, rainfall) are *a posteriori* linearly detrended.

3. Results

3.1. Main Differences in the Rainfall Datasets

[18] Figure 1a shows that IRD and CRU rainfall datasets are consistent in terms of interannual variability of annual

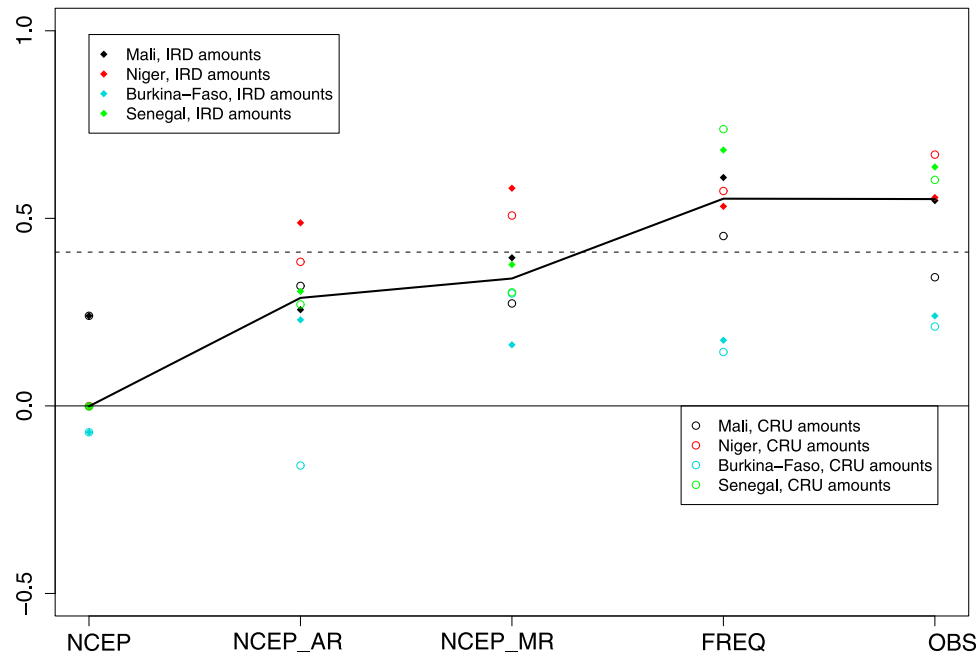


Figure 2. Model score (correlation between observed and simulated yields) across the different simulations, for different countries. The dotted line is the 5% significance level (for a correlation over 23 years). The solid black line is the median score. Colours refer to countries, symbols to the targeted annual amounts (IRD or CRU).

rainfall. However they show large differences in rainfall amounts. NCEP/NCAR, on the other hand, does not accurately capture the observed interannual variability of annual rainfall, as illustrated by the low correlation with observations (either IRD or CRU). In addition, the probabilistic distribution function of daily rainfall in NCEP/NCAR is biased, with too many medium rain events (between 5 and 15mm) and not enough larger events (above 15mm) (Figure 1b). This illustrates the well-known “drizzle rain” bias of climate models. Finally, although NCEP/NCAR correctly represents the atmospheric dynamics of the monsoon (pre-onset, onset [Sultan and Janicot, 2003]), first rain events tend to occur too late each year over most of the simulation domain, as shown by the difference in average sowing dates computed by ORCHIDEE-mil between the NCEP and IRD simulations (Figure 1c).

3.2. Model Performance in Predicting Interannual Variability

[19] Figure 2 shows the model score, defined as the correlation over 1968–1990 between observed and simulated annual national yield, for all countries and for each climate forcing. The median score provides an aggregated measure of the model skill over the simulation domain (while not overweighting extreme values). It is nil in the NCEP simulation, but it increases as the rain forcing becomes more realistic, up to 0.55 in the OBS simulation. Most of this increase takes place in two steps: when the right inter-annual variability of annual rainfall is included (from NCEP to NCEP_AR), and when the right rain frequency is included (from NCEP_MR to FREQ). The median score only becomes significant after this second step. Correcting the monthly cycle or including the real timing of rain events does not substantially increase the median score. Beyond this increasing

trend, there is a large dispersion between countries (~ 0.5), with Burkina-Faso always showing the lowest score, and Niger tending to show the highest one. There are no systematic differences between simulations with CRU or with IRD annual rain amounts.

3.3. Effect of Cumulative Rainfall Variability

[20] Agriculture in Sudano-Sahelian West Africa is mostly water-limited: observed national yields are strongly correlated, on a year-to-year basis, with observed annual rainfall (from CRU or from IRD) (Table 1). Cumulative rainfall is the first-order large-scale “climate signal” [Challinor *et al.*, 2003] in yield data – correlations with other variables are not significant (not shown). Since NCEP/NCAR rainfall is poorly correlated with rainfall observations (section 3.1), FAO yields are not significantly correlated with NCEP/NCAR annual rainfall (Table 1).

[21] Simulated yields in ORCHIDEE are also mostly water-limited: in nearly all cases, simulated yields are significantly correlated with the annual rainfall from the forcing dataset (Figure 3a). As a consequence from these two

Table 1. Correlations Over 1968–1990 Between Observed FAO Yields and Annual Rainfall Either From NCEP Reanalysis or From Observations^a

	NCEP Rainfall	Observed Rainfall (IRD/CRU)
Mali	0.21	0.41/0.32
Niger	0.18	0.58/0.61
Burkina-Faso	0.15	0.47/0.46
Senegal	0.26	0.72/0.68

^aAll time series are linearly detrended. Observations are from IRD or CRU. Correlations significant at the 5% level are in bold.

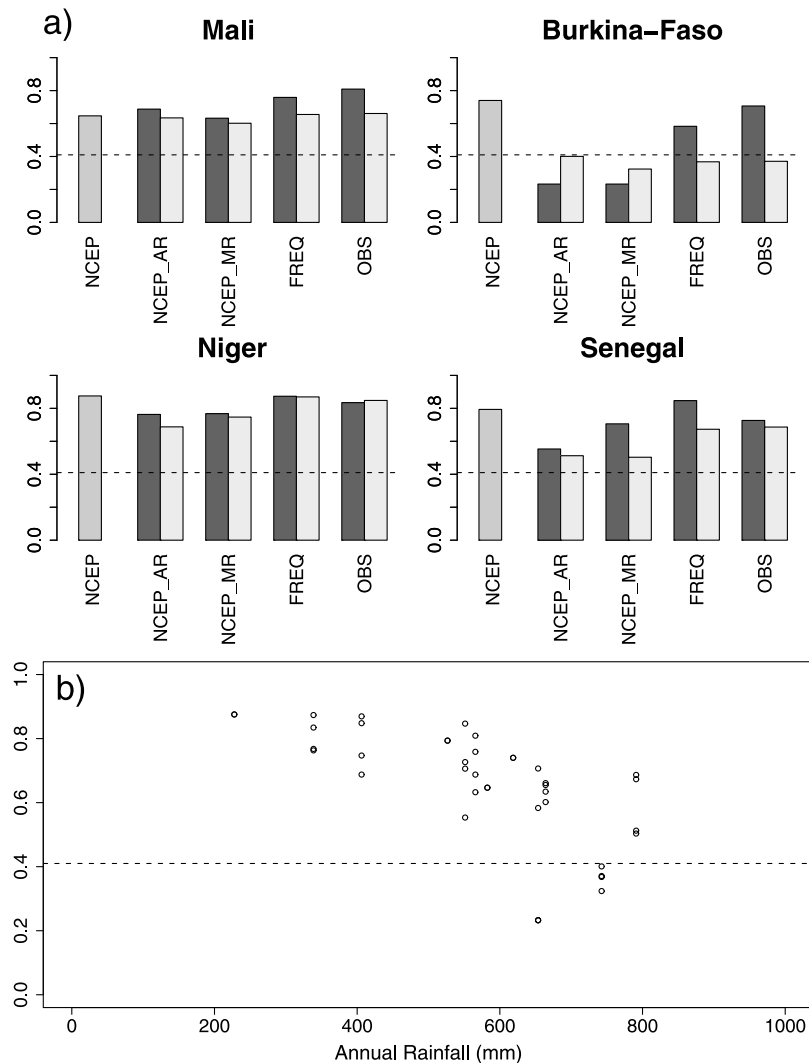


Figure 3. (a) Correlations over 1968–1990 between simulated yields and annual rainfall across the various simulations. Dotted line shows the 5% significance level. Black bars are simulations with IRD annual rainfall, grey bars the ones with CRU annual rainfall. (b) Same correlations, all simulations and all countries, as a function of mean annual rainfall.

relationships (in observations and in the model), yields simulated with NCEP/NCAR can not be expected to correlate well with observations. Conversely, including the proper cumulative rainfall variability, like in NCEP_AR, increases the model score. In other words, one can not simulate yield variability without the right cumulative rainfall variability in input. Since NCEP/NCAR reanalysis can already be considered as a good description of climate at the GCM scale, one may question the ability of any climate model to perform better than NCEP/NCAR in terms of yield simulation.

3.4. Effect of Daily Rainfall Distribution

[22] Between NCEP_MR and FREQ, the model median score increases a second time. This results from a more realistic representation of daily rainfall temporal characteristics (frequency, intensity), since both simulations have the same monthly and annual cumulative rainfall.

[23] The correlation between simulated yields and input annual rainfall increases between the two simulations (Figure 3a). Since observed yields are also strongly corre-

lated to rainfall, this leads, all other things being equal, to a higher correlation between simulated and observed yields.

[24] Simulated yield/rainfall correlations reflect the strength of the water limitation on crop productivity in the model. This is illustrated by the increase in correlations as mean annual rainfall decreases (Figure 3b). For instance, correlations in the NCEP simulation are generally higher because annual rainfall is lower (Figure 1a). Therefore, the higher correlation in FREQ than in NCEP_MR means that rainfall with a proper frequency constrains crop productivity more strongly than “drizzle” rainfall. This can also be seen in the decrease in average simulated yield (not shown): 12% on average for Mali and Senegal. Drizzle rainfall induces a positive bias in simulated plant productivity: small and frequent rain events reduce water stress, increasing the plant’s ability to assimilate carbon. This is a well-known bias in crop modelling: using large-scale climate model outputs as forcing tends to artificially increase crop production [e.g., *Baron et al.*, 2005]. Here, we show that it also undermines the model skill, as it weakens the correlation between input rainfall and simulated yield.

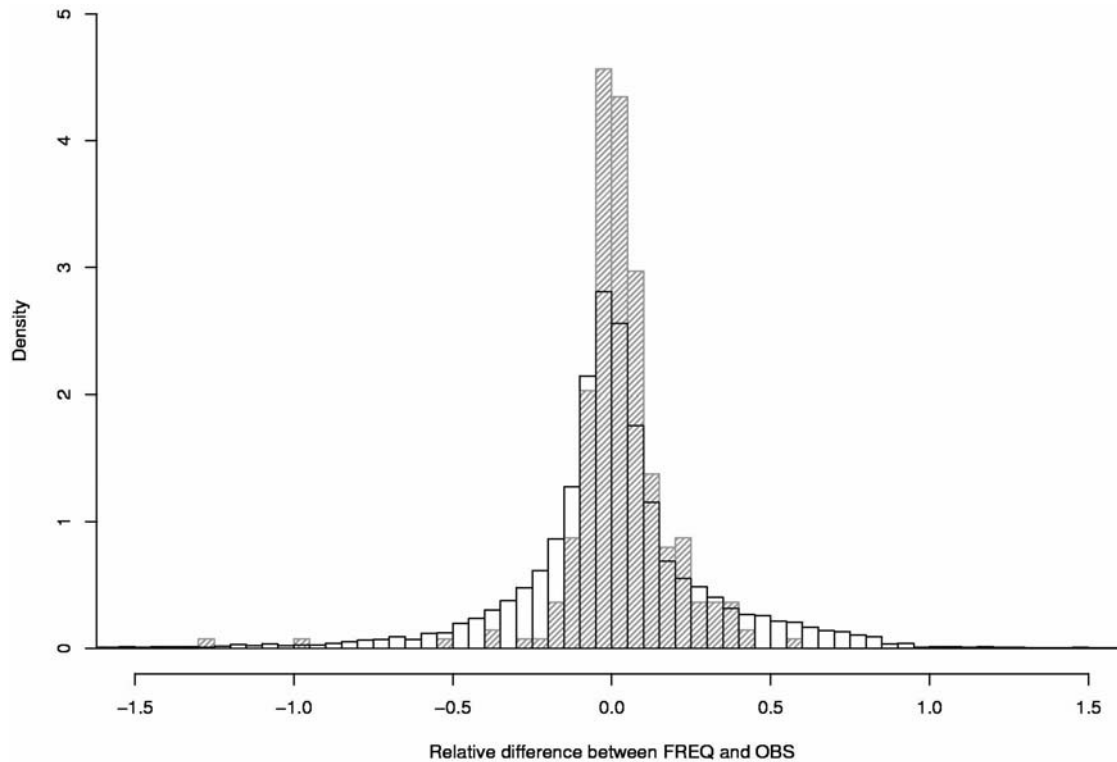


Figure 4. Frequency distribution of the relative differences in yields between FREQ and OBS simulations. Calculations are done at the pixel scale (open bars) and at the country scale (hatched grey bars), all pixels (or countries) and all years considered.

3.5. Effect of Intraseasonal Distribution

[25] The median model score only very slightly increases between NCEP_AR and NCEP_MR. Similarly, there is no increase in model score between the FREQ and OBS simulations. At the scale considered here, information on the chronology of rainfall – whether monthly or daily – does not add to the model skill.

[26] Intraseasonal rainfall chronology has been shown to have significant effects on millet yields in West Africa at plot scale [e.g., *Winkel et al.*, 1997]. Figure 4 shows that the model responds at the pixel scale to the differences in rainfall forcing between the FREQ and OBS simulations. Although we do not have the small-scale yield observations to evaluate the simulations over each pixel, we believe ORCHIDEE-mil, as a process-based model with a daily temporal resolution, is able to capture some of the impacts of rainfall chronology on yields at this scale. However, the aggregation towards national scale substantially reduces the differences between the two simulations (Figure 4): local impacts compensate each other over the whole country. Hence, correlations between simulated and observed yields do not differ between FREQ and OBS. This suggests that intraseasonal distribution variability does not show a spatial consistency large enough to impact simulated yields aggregated on a wider scale. Around each pixel, the area within which intraseasonal rainfall events are significantly correlated is no larger than a few pixels (1.27 on average). Although such results are likely to be resolution-dependant and require further investigation, they suggest that intraseasonal distribution variability is relevant at smaller spatial scales, but is

not spatially consistent enough to impact simulated large-scale yield variability. This may further suggest that simple statistical models based on growing season averages can favourably compare at large scale with process-based models [*Lobell and Field*, 2007, 2008]. Here indeed, observed rainfall/yield correlations (tab.1) are on average similar to the model score when forced by observations (0.53 and 0.55, respectively); however, a fairer comparison would imply an out-of-sample assessment of the statistical relationship. In general, as they do not resolve biophysical processes, statistical models may not perform well when projected under changing climates and environments (for instance, increased atmospheric CO₂ levels) [*Challinor et al.*, 2003].

4. Conclusion

[27] By forcing ORCHIDEE-mil over West Africa with a range of climate datasets, we assessed the sensitivity of the model skill to different features of rainfall. The two essential rainfall features for the model to skillfully simulate yield variability at the country scale are cumulative annual rainfall variability and rainfall temporal characteristics (frequency/intensity). Although our results are limited to West Africa, we feel confident that they can be extrapolated to similar water-limited crop regions. At such a scale, providing additional information on the intraseasonal rainfall distribution does not seem to improve the model skill. Whether this last result is resolution- or region-dependant remains to be investigated.

[28] Our results come from a single crop model: their robustness could be further assessed by repeating our anal-

ysis with other models; however, they already give indications on the characteristics of rainfall that climate models should ideally be able to simulate if climate forecasts are to be used to drive crop simulations. The increase in model score in this study, as rainfall is progressively corrected, suggests that improvements in GCM simulations are likely to translate into more accurate yield predictions.

References

- Baron, C., et al. (2005), From GCM grid cell to agricultural plot: Scale issues affecting modelling of climate impact, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, **360**, 2095–2108, doi:10.1098/rstb.2005.1741.
- Berg, A., B. Sultan, and N. de Noblet-Ducoudré (2010), Including tropical croplands in a terrestrial biosphere model: Application to West Africa, *Clim. Change*, in press.
- Challinor, A. J., et al. (2003), Toward a combined seasonal weather and crop productivity forecasting system: Determination of the working spatial scale, *J. Appl. Meteorol.*, **42**, 175–192, doi:10.1175/1520-0450(2003)042<0175:TACSWA>2.0.CO;2.
- Challinor, A. J., et al. (2005), Simulation of crop yields using ERA-40: Limits to skill and nonstationarity in weather–yield relationships, *J. Appl. Meteorol.*, **44**, 516–531, doi:10.1175/JAM2212.1.
- Dingkuhn, M., C. Baron, V. Bonnal, F. Maraux, B. Sarr, B. Sultan, A. Clopes, and F. Forest (2003), Decision-support tools for rain-fed crops in the Sahel at the plot and regional scale, in *A Practical Guide to Decision-Support Tools for Agricultural Productivity and Soil Fertility Enhancement in Sub-Saharan Africa*, edited by T. E. Struif-Bontkes and M. C. S. Wopereis, pp. 127–139, Int. Finan. Dev. Co., Muscle Shoals, Ala.
- Hansen, J. W., A. J. Challinor, A. Ines, T. R. Wheeler, and V. Moron (2006), Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges, *Clim. Res.*, **33**, 27–41, doi:10.3354/cr033027.
- Janicot, S., and B. Sultan (2001), Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 523–526, doi:10.1029/2000GL012424.
- Jones, P. G., and P. K. Thornton (2003), The potential impacts of climate change in tropical agriculture: The case of maize in Africa and Latin America in 2055, *Global Environ. Change*, **13**, 51–59, doi:10.1016/S0959-3780(02)00090-0.
- Kistler, R., et al. (2001), The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **82**, 247–267, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2.
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice (2005), A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cycles*, **19**, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199.
- Lobell, D. B., and C. B. Field (2007), Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming, *Environ. Res. Lett.*, **2**, 014002, doi:10.1088/1748-9326/2/1/014002.
- Lobell, D. B., M. B. Burke, C. Tebaldi, M. D. Mastrandrea, W. P. Falcon, and R. L. Naylor (2008), Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030, *Science*, **319**, 607–610, doi:10.1126/science.1152339.
- New, M., M. Hulme, and P. Jones (1999), Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961–90 mean monthly terrestrial climatology, *J. Clim.*, **12**, 829–856, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<0829:RTCSTC>2.0.CO;2.
- New, M., M. Hulme, and P. Jones (2000), Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate, *J. Clim.*, **13**, 2217–2238, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2217:RTCSTC>2.0.CO;2.
- Ngo-Duc, T., J. Polcher, and K. Laval (2005), A 53-year forcing data set for land surface models, *J. Geophys. Res.*, **110**, D06116, doi:10.1029/2004JD005434.
- Oram, P. A. (1989), Sensitivity of agricultural production to climatic change, an update, pp. 25–44, *Clim. and Food Security*, Int. Rice Res. Inst., Manila.
- Randall, D. A., et al. (2007), Climate models and their evaluation, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, edited by S. Solomon et al., pp. 611–612, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Sultan, B., and S. Janicot (2000), Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intraseasonal variability, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3353–3356, doi:10.1029/1999GL011285.
- Sultan, B., and S. Janicot (2003), The West African monsoon dynamics. Part II: The “preonset” and “onset” of the summer monsoon, *J. Clim.*, **16**, 3407–3427, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3407:TWAMDP>2.0.CO;2.
- Sultan, B., et al. (2005), Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon, *Agric. For. Meteorol.*, **128**, 93–110, doi:10.1016/j.agrformet.2004.08.005.
- Winkel, T., J.-F. Renno, and W. A. Payne (1997), Effect of the timing of water deficit on growth, phenology and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grown in Sahelian conditions, *J. Exp. Bot.*, **48**, 1001–1009, doi:10.1093/jxb/48.5.1001.

A. Berg and B. Sultan, LOCEAN, IPSL, Boite 100, T45/55, 4 Pl. Jussieu, F-75252 Paris CEDEX 05, France. (alexis.berg@locean-ipsl.upmc.fr)
N. de Noblet-Ducoudré, LSCE, IPSL, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

L'article précédent montre donc que lorsqu'on améliore le forçage climatique sur l'Afrique de l'Ouest, les performances d'ORCHIDEE-mil tendent également à s'améliorer. Fondamentalement, cela montre que dans le contexte d'un système de modélisation combiné climat/agriculture, les améliorations de la modélisation climatique se transmettent à la modélisation agronomique. Les corrélations entre rendements observés et simulés, en moyenne, augmentent ; d'autre part, le biais moyen du modèle (surestimation des rendements) est également légèrement réduit. Cela suggère donc qu'une partie des erreurs du modèle sur cette région (cf. section 1) peuvent être imputées aux biais du forçage NCC.

Dans la section suivante, en réponse au point iii) de la section 1.2.c de ce chapitre, sont présentés les résultats obtenus sur l'Inde, avec des simulations similaires à celles présentées dans l'article de la première section de ce chapitre.

3. Evaluation des rendements simulés, et de leur variabilité interannuelle, sur l'Inde

A la suite des travaux présentés dans l'article précédent, et aussi dans une perspective d'élargir l'utilisation d'ORCHIDEE-mil à d'autres régions que l'Afrique de l'Ouest si le modèle devait à terme être utilisé sur l'ensemble de la bande tropicale, le modèle est donc testé sur la région de l'Inde.

a. Culture du mil en Inde

L'Inde est, avec l'Afrique, une des régions où le mil est le plus cultivé : la production de mil en Inde est presque équivalente (sur une période récente comme 2003-2005) à celle de l'Afrique de l'ouest dans son ensemble. Comparée à l'Afrique de l'Ouest, la surface cultivée y est certes moins importante (d'un facteur presque 2) mais la productivité y est – en général - supérieure (voir tab.2.2). Si l'on considère les pays individuellement, étant donné sa plus grande superficie l'Inde est donc le plus gros producteur de mil, en surface et en quantité produite. L'Inde partage aussi avec l'Afrique de l'Ouest le fait d'être soumis à un climat de mousson, avec une saison des pluies se produisant à peu près au même moment de l'année : cela permet d'envisager une application du modèle assez directe selon le même protocole que sur l'Afrique de l'Ouest (sans modifier par exemple la fenêtre de semis définie dans la section 4.1.1 de l'article précédent).

Pays	Surface cultivée (Mha)	Production (Mt)	Rendement (kg/ha)
Inde	9.81	9.3	940
Niger	7.92	2.48	310
Nigeria	4.61	6.71	1450
Soudan	2.03	0.60	300
Mali	1.61	1.13	700
Burkina-Faso	1.27	1.11	870
Senegal	0.78	0.52	670
Total	28.03	21.85	780

Tab.2.2: Surface cultivée, production et rendement moyen de mil dans les pays producteurs de mil d'Afrique de l'Ouest et en Inde, selon les données de la FAO.

La figure 2.2, tirée, comme dans l'article précédent, de Monfreda et al. (2008), présente la répartition géographique de la culture du mil sur le sous-continent indien : le mil est

principalement cultivé sur les zones semi-arides et arides de l'Ouest (voir sur la fig.2.4a la répartition des pluies).

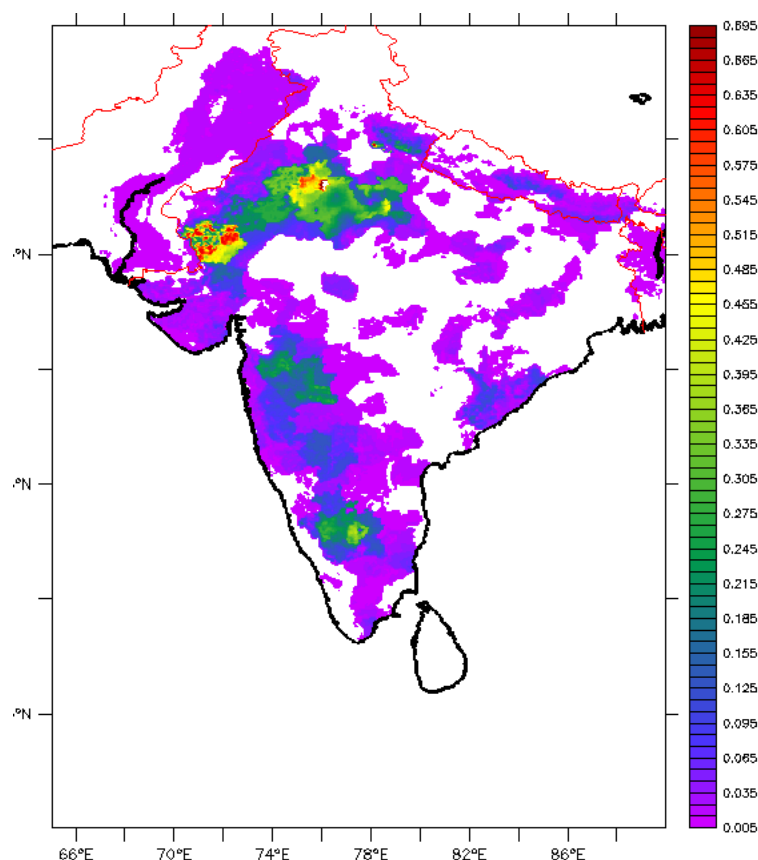


Fig.2.2 : Répartition spatiale de la culture du mil en Inde, en fraction de pixel. Les zones où cette fraction est inférieure à 0.5% sont laissées en blanc. D'après les données de Monfreda et al. (2008).

b. Simulation d'ORCHIDEE-mil

Les simulations sont réalisées avec ORCHIDEE-mil selon le même protocole que dans l'article de la section 1 : le modèle est forcé par les données NCC sur 1961-1999, sur une fenêtre régionale incluant l'Inde (68°E-90°E ; 5°N-35°N). Le modèle ne simule pas d'irrigation - ce qui, en Inde, est valable pour le mil, mais ne l'est pas pour des cultures comme le blé ou le riz, pour lesquelles l'irrigation peut-être un facteur important (35% des surfaces agricoles sont irriguées en Inde). A la différence de l'article de la première section on ne réalise ici qu'une simulation avec une variété d'environ 90 jours (i.e., 1500 degré.jours).

Le mil est simulé sur l'ensemble du domaine ; une valeur moyenne du rendement simulé est dérivée pour le pays en pondérant les sorties du modèle par la carte de la fig.2.2, afin de permettre la comparaison aux données FAO (de même pour l'agrégation d'une pluie moyenne sur le pays). La figure 2.3 montre que les rendements de mil ont presque doublé en Inde entre 1960 et 2000 : même si cette tendance reste moindre que pour d'autres cultures comme le riz ou le blé (voir aussi fig.2.7 plus loin dans ce chapitre), cette augmentation est le résultat des progrès agronomiques de la Révolution Verte, dont l'Inde a été un des principaux bénéficiaires. Comme on ne prend en compte ici que les facteurs climatiques, et qu'on

s'intéresse essentiellement à la variabilité interannuelle des rendements, toutes les séries utilisées (rendements observés et simulés, pluies) sont linéairement détrendées⁶.

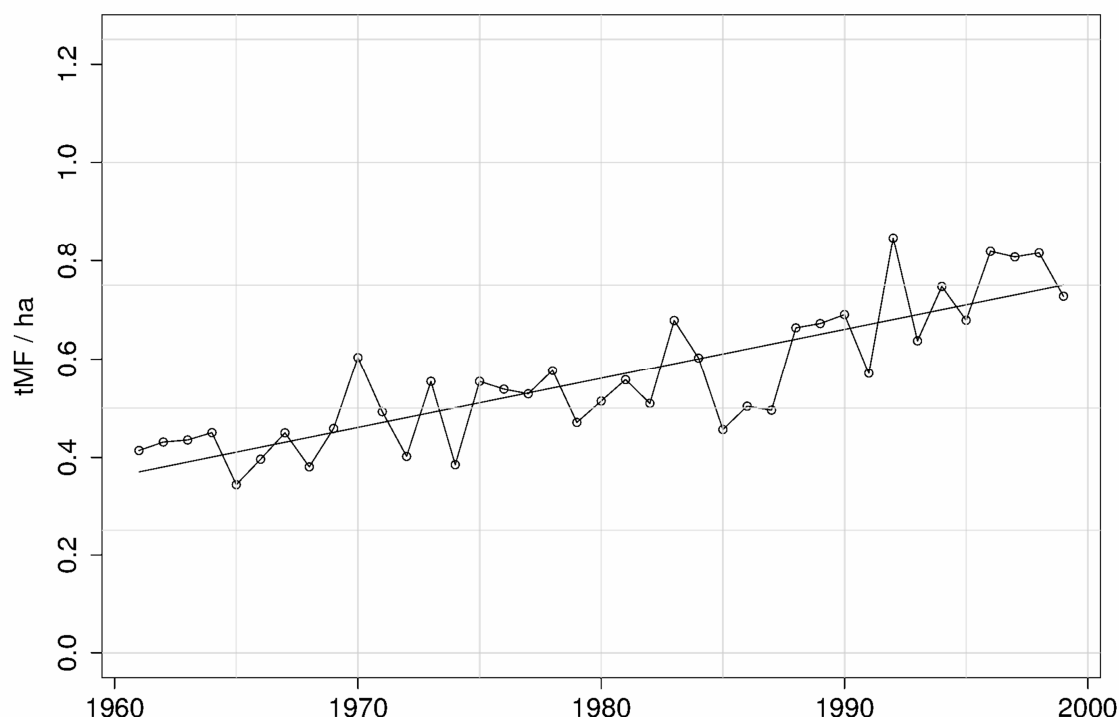


Fig.2.3 : Rendement moyen de mil en Inde entre 1960 et 1999, données de la FAO (tonnes de Matière Fraîche par hectare). La droite en traits pleins représente la tendance linéaire calculée sur cette période.

c. Rendements simulés

La figure 2.4 est similaire aux figures 5 et 6 de l'article de la première section. Elle montre que, comme en Afrique de l'Ouest, la distribution spatiale du rendement moyen simulé, ainsi que celle des dates de semis, reflètent, respectivement, le gradient de cumul pluviométrique et la propagation intrasaisonnière de la mousson (du sud-est au nord-ouest). Cette dépendance à la pluie explique également la plus forte variabilité du rendement simulé dans les zones où les pluies sont plus faibles et plus variables (fig.2.4d). Au sud-ouest de l'Inde, la zone de rendements légèrement plus élevés correspond à une région de températures légèrement plus basses (du fait du relief) : cela a pour effet d'allonger la durée du cycle (en jours). Bien que moins abondantes dans cette région, les pluies restent suffisantes pour que cet allongement de cycle se traduise, dans le modèle, par une biomasse et un rendement un peu plus importants. Les données spatialisées de rendements et de semis, obtenues pour l'Afrique de l'Ouest auprès de l'Agrhymet, ne sont pas disponibles ici pour évaluer la simulation de cette distribution spatiale.

Comparer les simulations aux données FAO montre que le rendement simulé en moyenne sur l'ensemble du pays (en pondérant par la fig.2.2) est, comme sur l'Afrique de l'Ouest, surestimé : 2.35 t/ha, contre 0.56 t/ha selon la FAO, en moyenne sur 1961-1999. La variabilité est également surestimée : 0.41 t/ha d'écart-type, contre 0.14 t/ha. Les raisons expliquant cette surestimation sont les mêmes que celles développées dans le premier article : fondamentalement, ORCHIDEE-mil (et d'une façon plus générale la plupart des modèles agronomiques) simule un rendement optimal atteignable sous contrainte climatique pour une

⁶ Faute d'un terme français approprié, on utilise dans ce manuscrit le terme « détrendé » sous l'acception : dont on a retiré la tendance (ici, linéaire).

variété « agronomique » productive, cultivée de façon intensive – sans contrainte de stress azoté ou stress biotique, notamment. C'est, typiquement, le rendement qui peut être observé en stations expérimentales lorsque la culture est conduite dans les meilleures conditions possibles. Murty et al. (2007), dans leur analyse des « yield gaps » pour le sorgho et le mil en Inde, reportent des écarts similaires entre expérimentations en stations (ou simulations agronomiques) et observations des rendements moyens au niveau des différents districts administratifs – interprétant cet écart comme le potentiel effectif d'augmentation des rendements paysans. Sous l'hypothèse que ce biais entre modèle et réalité ne varie pas fortement d'une année sur l'autre, il reste possible d'analyser la variabilité interannuelle des rendements simulés et de la comparer aux observations.

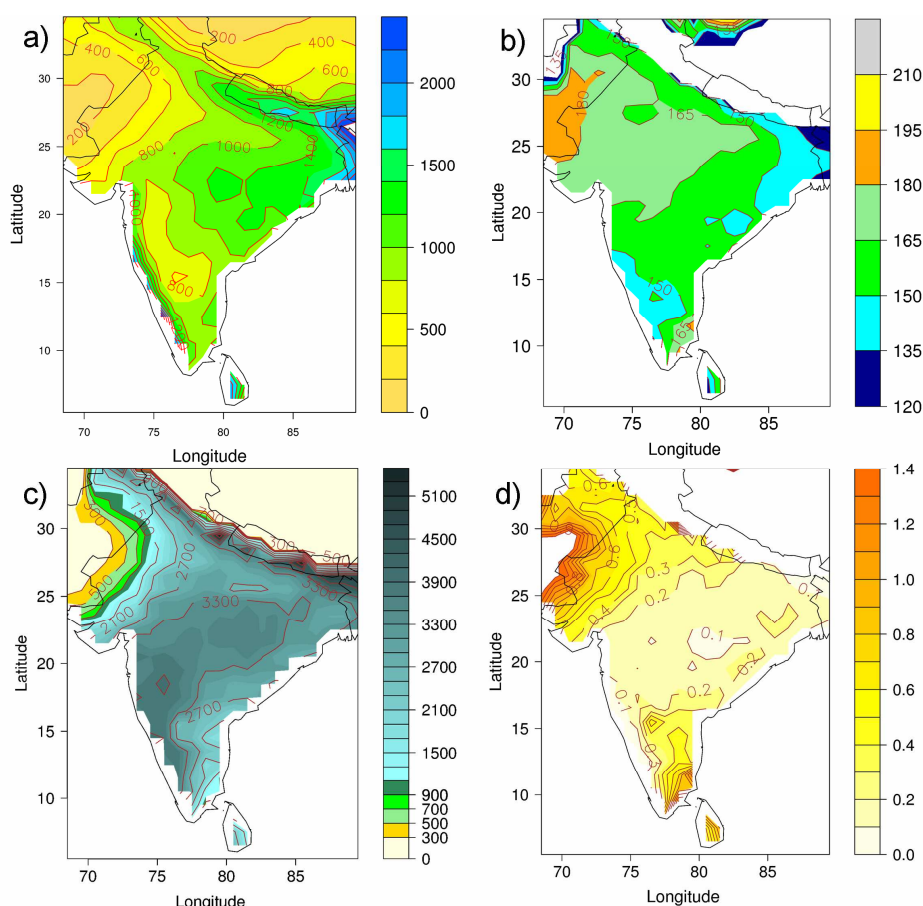


Fig.2.4 : sur 1961-1999 : a) Pluviométrie annuelle moyenne issue de des données NCC (Ngo-Duc et al. 2005), b) dates de semis moyennes simulées, c) rendements moyens simulés, d) coefficient de variation des rendements simulés. Pour faciliter la comparaison les échelles de couleur sont les mêmes que sur les figures 5 et 6 de l'article de la première section de ce chapitre.

d. Variabilité des rendements simulés, et comparaison avec l'Afrique de l'Ouest

Les données interannuelles de rendement FAO (détrendées) sont fortement corrélées aux variations de pluviométrie (détrendées) : $R=0.59$, ce qui reflète bien la dépendance au climat d'une agriculture pluviale dans un environnement limité en eau. Le modèle reproduit qualitativement cette dépendance à la pluie, mais en la surestimant : $R=0.81$. Le modèle n'étant piloté que par le climat, qu'il surestime l'influence des variables climatiques sur le rendement, par comparaison à une myriade de situations réelles où celui-ci est influencé par de nombreux autres facteurs (biotiques, socio-économiques), est un comportement attendu, relevé également par Challinor et al. (2005) dans leur étude sur l'Inde.

La figure 2.5 montre que, sur l'Inde dans son ensemble, le modèle est capable de bien capturer la variabilité interannuelle observée du rendement : $R=0.68$ sur l'ensemble de la période. En particulier, le score est ici supérieur à la corrélation entre rendement et pluie ($R=0.59$), ce qui suggère que le modèle est capable d'apporter une information supplémentaire à une simple relation statistique basée sur la pluie.

On constate aussi que ce score est plus élevé que pour chacun des pays d'Afrique de l'Ouest considérés (le meilleur score étant 0.53 pour le Burkina-Faso). Néanmoins, il faut ici considérer le score pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, de façon à ce que la comparaison entre Inde et Afrique de l'Ouest se fasse pour des surfaces comparables. En effet, la corrélation entre rendements observés et simulés peut dépendre de l'échelle considérée : en particulier le fait de considérer une plus grande échelle permet à des erreurs locales de se compenser. On agrège donc les simulations et les pluies sur l'ensemble d'Afrique de l'Ouest (en pondérant par la carte de zones de mil), et pour les observations on moyenne les données FAO des différents pays d'Afrique de l'Ouest en pondérant par leurs surface respectives en mil. Le score du modèle sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (surface environ équivalente à l'Inde) est alors $R=0.48$. Le fait que ce résultat soit supérieur à la moyenne des scores sur les différents pays illustre l'importance de l'échelle spatiale dans l'analyse des résultats du modèle – un point souligné également par Challinor et al. (2004). Néanmoins, on note qu'à échelle comparable la performance du modèle reste moins bonne sur l'Afrique de l'Ouest que sur l'Inde : si on suppose que le modèle représente la réponse au climat des rendements de la même façon sur l'Inde et l'Afrique de l'Ouest (deux environnements similaires), on peut alors suggérer que ce meilleur score sur l'Inde résulte simplement de la plus grande précision des données FAO, qui reflètent davantage l'impact du climat sur les rendements. Un modèle uniquement forcé par le climat est alors capable de mieux représenter la variabilité observée. Cela suggère donc aussi que l'erreur du modèle sur l'Afrique de l'Ouest dans le premier article provient en partie de l'imprécision des données FAO, comme il avait été suggéré dans le point iii) de la section 1.2.

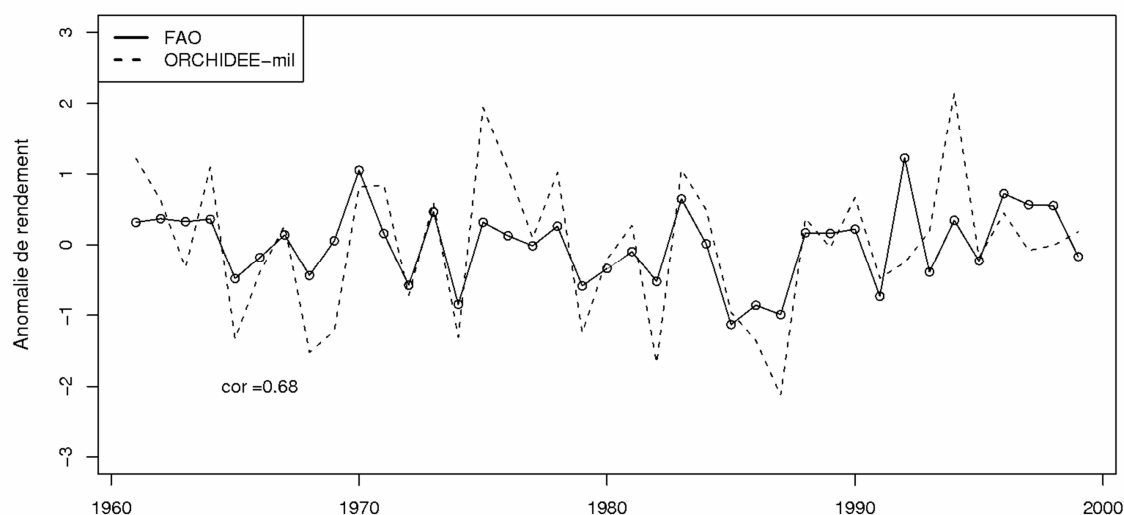


Fig.2.5 : Corrélation entre rendement simulé (ORCHIDEE-mil) et observé (FAO) sur l'Inde, en anomalies standardisées.

On pourrait également invoquer, pour expliquer le meilleur comportement du modèle sur l'Inde, la possible plus grande qualité (notamment en termes de pluies) du forçage NCC sur cette région par rapport à l'Afrique de l'Ouest. Cette hypothèse n'a pas été testée ici – mais la figure 2 de l'article de la section 2 montre que même lorsque le modèle est forcé par les observations de pluies sur l'Afrique de l'Ouest, le score du modèle reste inférieur à celui

obtenu pour l'Inde ; et de plus, il est tout aussi possible, à l'inverse, que le forçage NCC contiennent également des biais sur l'Inde : il serait nécessaire de répéter cette expérience de sensibilité sur cette région, en forçant ORCHIDEE-mil non par les données NCC mais par des observations. Il se peut que le score du modèle soit alors encore supérieur.

Les résultats obtenus sur l'Inde montrent donc qu'ORCHIDEE-mil est capable de simuler une part importante de la variabilité des rendements à grande échelle, suggérant que le modèle représente avec précision l'impact du climat sur les rendements. Encore une fois, il est difficile d'évaluer objectivement la qualité des données FAO des différents pays – et il faut se garder de nécessairement remettre en cause les données lorsque la comparaison aux simulations n'est pas, comme sur l'Afrique de l'Ouest, entièrement favorable au modèle : néanmoins les résultats obtenus sur l'Inde suggèrent que les résultats moins favorables obtenus sur l'Afrique de l'Ouest sont en partie dus à l'imprécision des données FAO sur cette région.

4. Application à la simulation d'autres cultures

Le modèle SARRAH, sur lequel est basé ORCHIDEE-mil, est appliqué à la simulation de céréales comme le mil (Baron et al. 2005) et le sorgho (Mishra et al. 2008). Les versions utilisées sont calibrées légèrement différemment selon les cas. ORCHIDEE-mil se basant sur une version de SARRAH utilisée pour le mil, les simulations ont jusqu'ici été comparées à des données (sur site, ou à l'échelle nationale avec les rendements FAO) de mil. Néanmoins, fondamentalement, on peut considérer qu'au premier ordre le modèle simule la réponse d'une céréale pluviale, dont le cycle est calé sur la saison des pluies, et dont le rendement est essentiellement contraint par la ressource hydrique ; au second ordre, les formalismes du modèle correspondent plus précisément au mil, mais dans ces conditions il est légitime de s'interroger également sur la capacité du modèle à simuler correctement la variabilité des rendements d'autres céréales qu'on peut supposer assez proches: sorgho, maïs, par exemple. Cela d'autant plus qu'ORCHIDEE est un modèle à vocation globale, dans lequel la représentation des cultures tropicales, à terme, ne peut se contenter de représenter une seule espèce comme le mil, mais a vocation à s'appliquer au moins à un type fonctionnel tel que « céréales tropicales », par exemple - un des 10 Crops Fonctionnal Types (CFTs) définis dans LPJ-mL (Bondeau et al. 2007).

Il s'agit donc ici de répéter l'analyse de l'article de la section 1 de ce chapitre avec d'autres cultures. On se focalise dans un premier temps sur l'Inde, étant donné que le modèle y a montré de bonnes performances (cf section précédente), que de nombreuses espèces y sont cultivées et que les statistiques agricoles y semblent fiables. Des résultats sur l'Afrique de l'Ouest seront également présentés à la fin de cette section.

Il s'agit donc ici de reprendre la même simulation sur l'Inde que dans la section précédente, en comparant les rendements simulés aux données FAO pour différentes cultures : mil, sorgho, maïs, arachide, blé, riz – une seule simulation est donc utilisée, les rendements simulés étant agrégés selon la distribution géographiques de ces différentes cultures en Inde (fig.2.6). De même les données de pluies, dans la suite de cette section, sont, pour chaque culture, agrégées selon ces différentes distributions spatiales.

La figure 2.7 montre l'évolution des rendements observés pour ces différentes cultures sur 1961-1999. On y constate notamment le quasi-triplement des rendements en blé et riz sur cette période, résultat de la Révolution verte (accroissement de la fertilisation, de l'irrigation, utilisation de variétés améliorées), qui s'est en partie répercutée sur les cultures plus vivrières que sont par exemple le mil ou le sorgho.

L'analyse de la relation entre rendements des cultures et climat est compliquée par le fait que la plupart des cultures en Inde peuvent être cultivées soit pendant la mousson (*kharif*), en été, soit pendant l'hiver (*rabi*), avec un semis après le retrait de la mousson. Dans le premier cas les cultures sont pluviales, dans le second il y a un recours important à l'irrigation. Certaines cultures sont davantage cultivées en *kharif* (mousson), d'autres en *rabi* (hiver): le blé (production : ~75 Mt) est ainsi exclusivement cultivé en *rabi* ; le maïs, l'arachide, le sorgho et le riz le sont davantage en *kharif* : les productions selon chaque saison de culture (*kharif/rabi*, i.e., pluvial/irrigué) pour ces dernières espèces sont, respectivement, environ : 15Mt/4Mt (maïs), 60Mt/15Mt (arachide), 4Mt/3Mt (sorgho), 80Mt/14Mt⁷ (riz). Les données FAO agrègent malheureusement les rendements des différentes saisons, donc il n'est pas possible de séparer la variabilité des rendements pluviaux (tels que simulés par le modèle) de celles des rendements *rabi*, irrigués.

⁷ Source : Ministère de l'Agriculture indien :

http://dacnet.nic.in/eands/Advance_Estimate/1st_Advance_English%282010-11%29.pdf

Culture	Corr. pluie/obs	Corr. sim/pluie	Corr. sim/obs (score)
Mil	0.59	0.81	0.68
Sorgho	0.22	0.64	0.31
Maïs	0.05	0.65	0.38
Arachide	0.72	0.75	0.59
Blé	-0.15	0.58	0.03
Riz	0.41	0.36	0.37

Tab.2.3 : Signal climatique (corrélation interannuelle entre pluie annuelle et rendements) dans les observations (1^{ere} colonne) et les simulations (2^{nde} colonne). Score du modèle : corrélation interannuelle entre rendements observés et simulés (3^{eme} colonne).

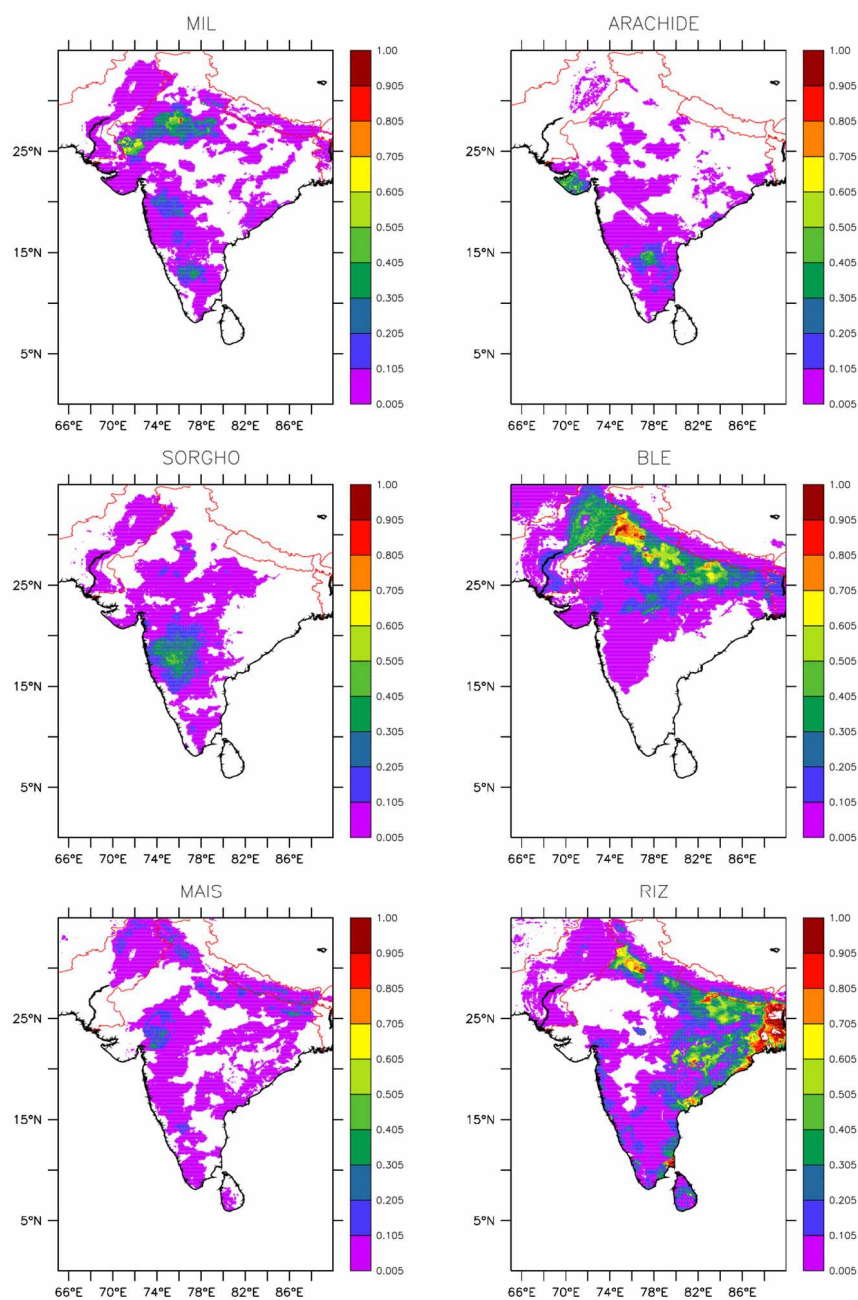


Fig.2.6 : fractions de pixel dévolues à la culture de différentes espèces agricoles en 2000. Tiré des données de Monfreda et al. (2008).

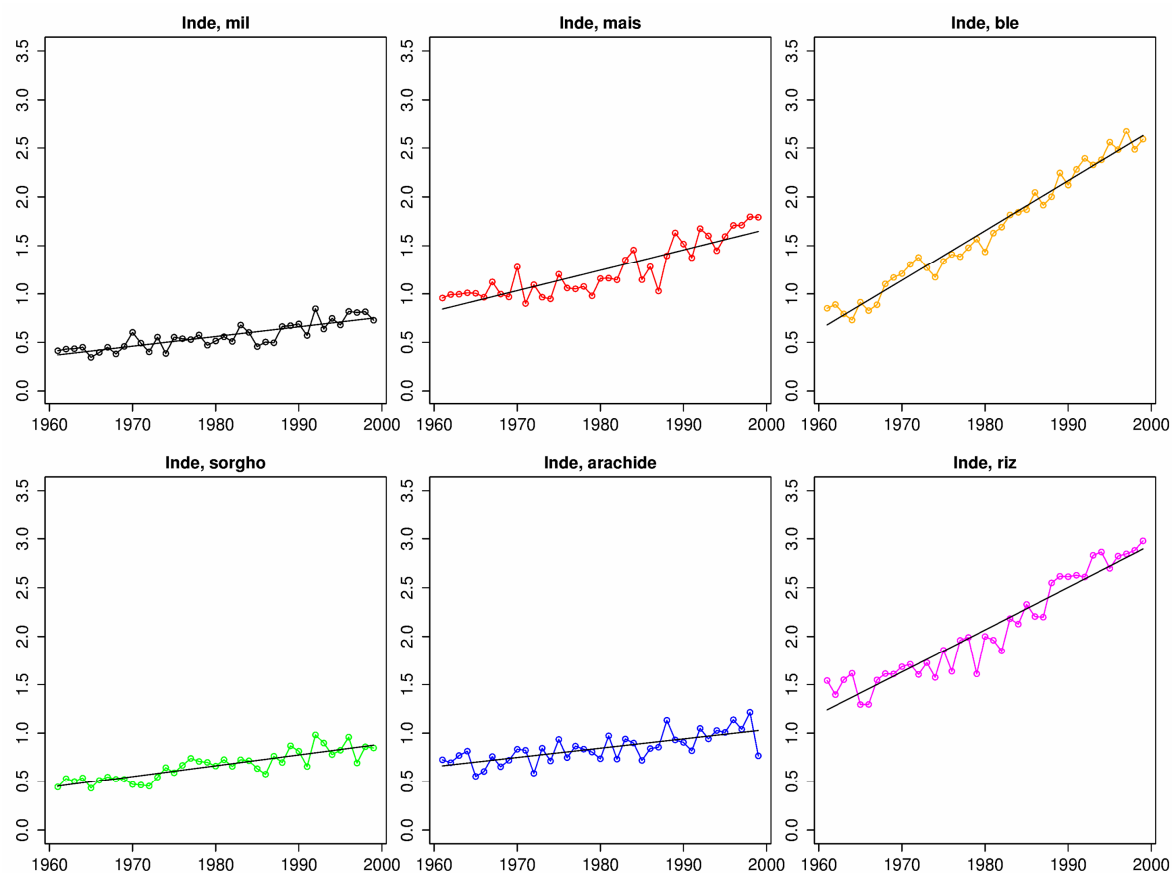


Fig.2.7 : rendement (t/ha) de différentes cultures en Inde entre 1961 et 1999, selon les données FAO. Les droites représentent les tendances linéaires sur la période.

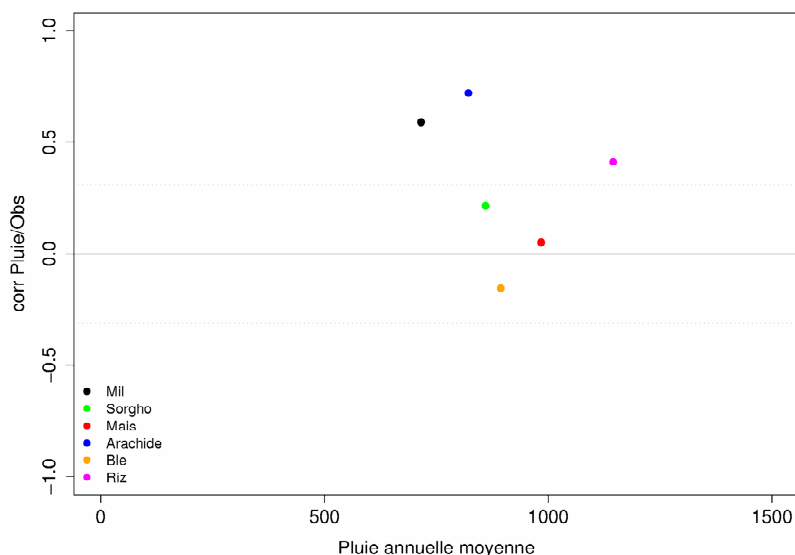


Fig.2.8 : Corrélations interannuelles, sur 1961-1999, entre rendements FAO (pour diverses cultures) et pluie annuelle, en fonction de la pluie annuelle (la pluie est agrégée sur la zone de culture de l'espèce considérée). Ce sont donc les mêmes valeurs que dans la 1^{ère} colonne du tableau 2.3. Les traits en pointillés représentent le niveau au-delà duquel les corrélations sont significatives à 95% (une corrélation sur 39 années est significative à 95% à partir de 0.31).

Le tableau 2.3 (1^{ère} colonne) montre la dépendance à la pluie de ces différentes productions – dépendance qui est donc globalement à mettre en rapport avec la saison de culture et le recours ou non à l'irrigation, les besoins hydriques différents de ces espèces, et les conditions climatiques moyennes des zones où elles sont cultivées (fig.2.8) : les cultures en *kharif* comme le mil ou l'arachide, et qui sont cultivées dans des zones globalement plus sèches, exhibent ainsi une dépendance à la pluie (i.e., une corrélation interannuelle entre pluie et rendements observés) plus importante. Pour le blé, la faible (voire négative) dépendance constatée provient donc de ce que le blé en Inde est exclusivement un blé d'hiver (*rabi*). Bien entendu, comme le modèle simule uniquement ici une culture de saison des pluies, les différences de corrélations entre rendements simulés et pluie pour les différentes cultures (fig.2.9) résultent uniquement des différentes zones d'agrégation de la simulation (fig.2.6) – et donc de la contrainte hydrique différente qui s'applique au modèle dans ces différentes zones : la figure 2.9 montre que plus la zone d'agrégation est, en moyenne, sèche, plus le rendement simulé est dépendant de la pluies (i.e., plus la corrélation interannuelle entre pluie et rendement simulés est importante – fig.2.9)

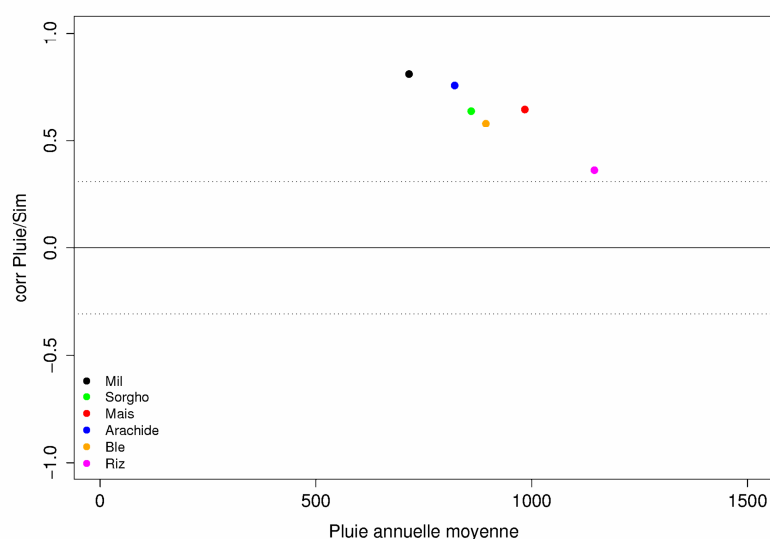


Fig.2.9 : Corrélations interannuelles, sur 1961-1999, entre pluie annuelle et rendements simulés (une seule simulation, mais qui est agrégée selon les cartes de répartition des différentes cultures – de même pour la pluie), en fonction de la pluie annuelle. Ce sont les mêmes valeurs que dans la 2^{ème} colonne du tableau 2.3. Les traits en pointillés représentent le niveau au-delà duquel les corrélations sont significatives à 95% (une corrélation sur 39 années est significative à 95% à partir de 0.31).

En termes de capacité du modèle à reproduire la variabilité observée des anomalies de rendements (3^{ème} colonne du tableau 2.3 et fig.2.10), la performance du modèle reste, comme attendu, la meilleure pour le mil ($R=0.68$). Elle est également bonne pour l'arachide ($R=0.59$), autre culture exhibant une forte dépendance à la pluie. Le score reste juste significatif pour le sorgho ($R=0.31$), le maïs ($R=0.38$) et le riz ($R=0.37$). Etant donné les conditions de culture du blé (exclusivement en irrigué), enfin, il est logique que le score du modèle soit nul ($R=0.03$). Sur ce dernier point, il est également intéressant de constater que le rendement observé en blé – irrigué – est bien moins variable que pour les autres espèces (fig.2.10).

Dans l'optique d'une analyse de la possibilité d'appliquer le modèle à différentes cultures, on aurait pu s'attendre à ce que le modèle soit plus performant sur des cultures physiologiquement plus proches du mil : sorgho, et dans une moindre mesure, maïs (des céréales en C4). Il est intéressant de constater que le score du modèle est en réalité plutôt

supérieur pour des espèces davantage différentes, telles que le riz (une céréale en C3) et surtout l'arachide (une légumineuse). Dans la mesure où ces différences ne sont pas des artefacts des données, il est possible de suggérer qu'au-delà du « type fonctionnel de plante », ce qui semble être également un facteur déterminant de la performance du modèle est plutôt le fait que la culture à laquelle le modèle est comparé présente dans la réalité une dépendance au climat similaire à celle que simule le modèle. C'est ici davantage le cas du mil, de l'arachide et du riz (tab.2.3, 1^{ère} colonne : le signal climatique vaut, respectivement, 0.59, 0.72 et 0.41). Ici le modèle simule essentiellement une limitation par la pluie : il est possible que pour le maïs, par exemple, les limitations climatiques soient dans la réalité différentes, et que le modèle ne les représente pas correctement. Pour le sorgho, il est également possible que la mauvaise performance du modèle soit simplement due à la plus grande proportion cultivée en *rabi* (irrigué).

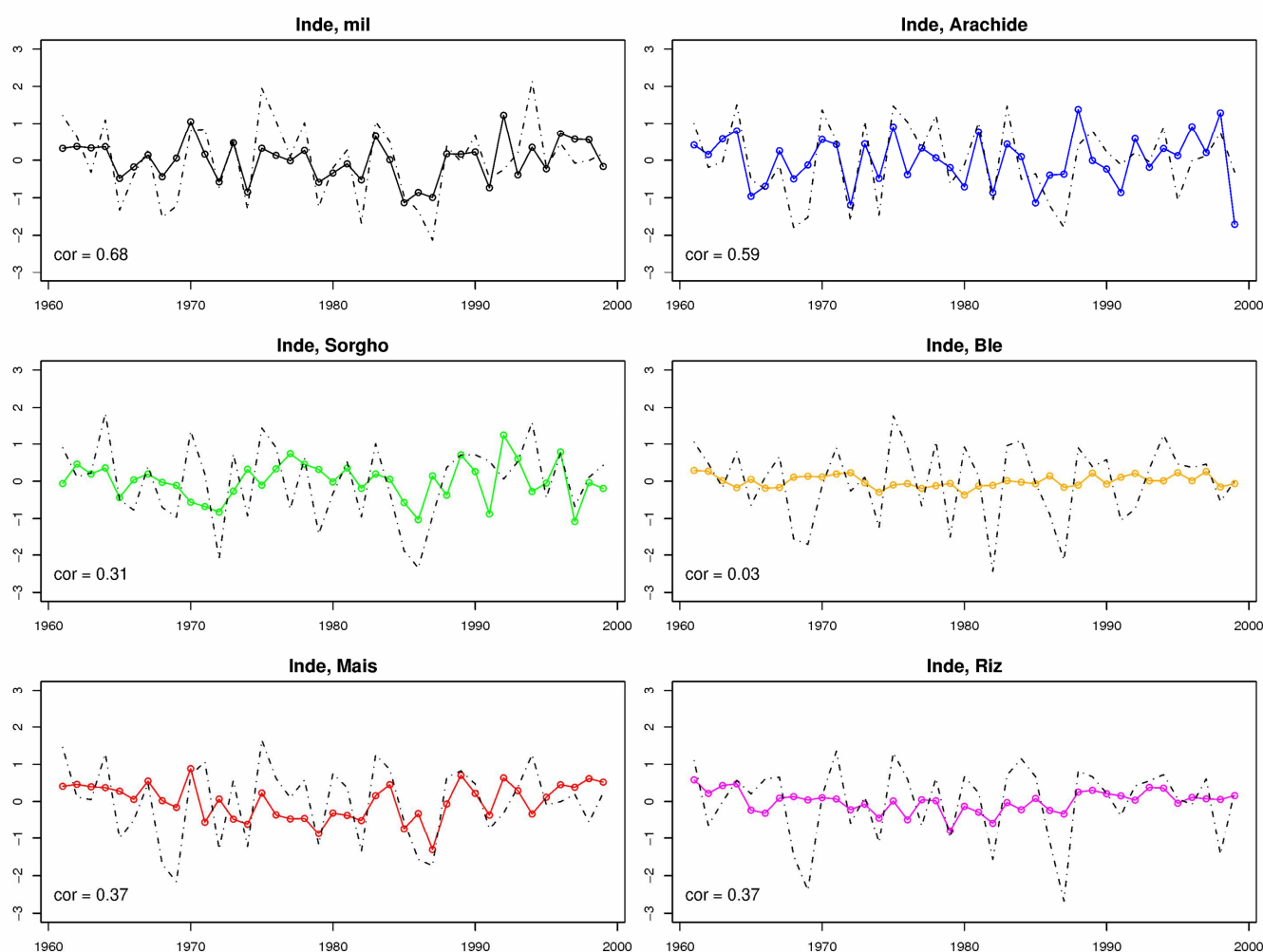


Fig.2.10 : séries (et corrélations) d'anomalies de rendement simulées (tirets) et observées (traits pleins) pour les différentes espèces cultivées. Les différences entre les courbes d'anomalies de rendements simulés par ORCHIDEE-mil dans les différents panels correspondent simplement aux différentes zones d'agrégation de chaque culture (cf fig.2.6) : il s'agit toujours de la même simulation, mais agrégée sur des zones différentes.

Il reste néanmoins possible de s'intéresser plus généralement à la capacité du modèle à simuler directement la variabilité des rendements d'une espèce générique « céréales tropicales, pluviales, en C4 », qui regrouperait maïs, sorgho, mil - telle qu'elle pourrait être définie, par exemple, dans un DGVM appliqué à grande échelle. On agrège alors les trois rendements FAO en pondérant par les surfaces de chaque espèce pour définir un rendement

observé moyen. On agrège également les rendements simulés directement sur l'ensemble des pixels correspondant aux trois cultures (fig.2.6). Dans ce cas, le score du modèle est alors $R=0.58$. On note que cela est supérieur à une simple corrélation avec la pluie ($R=0.42$). Il faut aussi noter que ce score est supérieur à la moyenne pondérée (par les surfaces) des scores respectifs pour les trois cultures (voir fig.2.10, la moyenne pondérée serait alors 0.48) : cela car l'agrégation de la simulation *en amont*, sur la zone commune des trois cultures, a tendance à lisser les erreurs entre les zones respectives.

On s'est ici focalisé sur l'Inde : la même analyse sur l'Afrique de l'Ouest donne des résultats similaires. Sans présenter l'analyse dans sa totalité, on reporte ici directement la corrélation entre rendements simulés et observés – en prenant en compte là aussi mil, sorgho, maïs : $R=0.54$. Comme dans la section 3d pour le mil pris isolément, on trouve là aussi, en considérant les trois céréales ensemble, de meilleurs résultats à une plus grande échelle qu'au niveau des pays individuellement.

Les résultats de cette section suggèrent donc qu'il est possible, malgré le score plus limité du modèle pour les autres cultures prises individuellement, d'appliquer ORCHIDEE-mil plus généralement, au-delà du seul mil, à une classe de zones cultivées partageant globalement les mêmes caractéristiques et correspondant aux « céréales tropicales, pluviales, en C4 ».

5. Discussion : modélisation mécaniste et modélisation statistique

Les résultats présentés dans les deux articles de ce chapitre, ainsi que dans les section 3 et 4, font ressortir la difficulté, pour le modèle, à simuler la variabilité interannuelle des rendements à l'échelle nationale avec plus de précision qu'une simple relation statistique basée sur une variable agrégée comme le cumul pluviométrique. Pour illustrer cela, le tableau 2.4 reprend les scores (corrélations interannuelles entre anomalies de rendements simulées et observées) et corrélations observations/pluie (corrélations entre anomalies de rendement observé et de cumuls pluviométriques annuels) du premier article, ainsi que des résultats sur l'Inde et l'Afrique de l'Ouest, pour le mil et pour les céréales en C4.

Culture	Pays	Corrélation pluie/obs.	Corrélation sim./obs.
Mil	Mali	0.34	0.15
	Niger	0.64	0.47
	Burkina-Faso	0.58	0.53
	Sénégal	0.49	0.29
	Tchad	0.49	0.32
	Afrique de l'Ouest	0.63	0.48
	Inde	0.59	0.68
Céréales en C4	Afrique de l'Ouest	0.69	0.54
	Inde	0.42	0.58

Tab.2.4 : Pour chacun des pays étudiés dans ce chapitre, valeurs des corrélations interannuelles entre pluie cumulée annuelle et rendements de mil de la FAO (1ère colonne) et corrélations interannuelles entre rendements simulés et rendements FAO (2nde colonne). Dans ce tableau 'Afrique de l'Ouest' correspond à l'ensemble des pays de cette région étudiés ici : Niger, Mali, Burkina-Faso, Sénégal, Tchad.

On constate que les corrélations pluie/rendements observés sont presque toujours supérieures aux corrélations entre rendements simulés et observés – l'exception étant, comme on l'a vu dans la section précédente, l'Inde (pour le mil comme pour les céréales en C4 dans leur ensemble). La figure 2.11 montre l'évolution de ces mêmes quantités dans les différents forçages utilisés sur l'Afrique de l'Ouest dans l'article de la section 2 : on constate que le score du modèle, même lorsqu'il est forcé par les meilleures observations possibles (OBS), ne dépasse que rarement la corrélation observée entre pluie et rendement.

Cette comparaison pourrait laisser penser que le modèle n'est pas vraiment utile en termes de prévision de la variabilité des rendements : si un modèle de climat est capable de prévoir la bonne pluviométrie sur le pays considéré, utiliser cette prévision comme forçage d'ORCHIDEE-mil n'apporterait pas systématiquement d'information supplémentaire pour prévoir l'anomalie de rendement correspondante, voire dégraderait cette information (dans les cas où le score du modèle est inférieur) - autant alors utiliser directement la prévision de pluies.

Toutefois, plusieurs éléments doivent venir nuancer ce jugement.

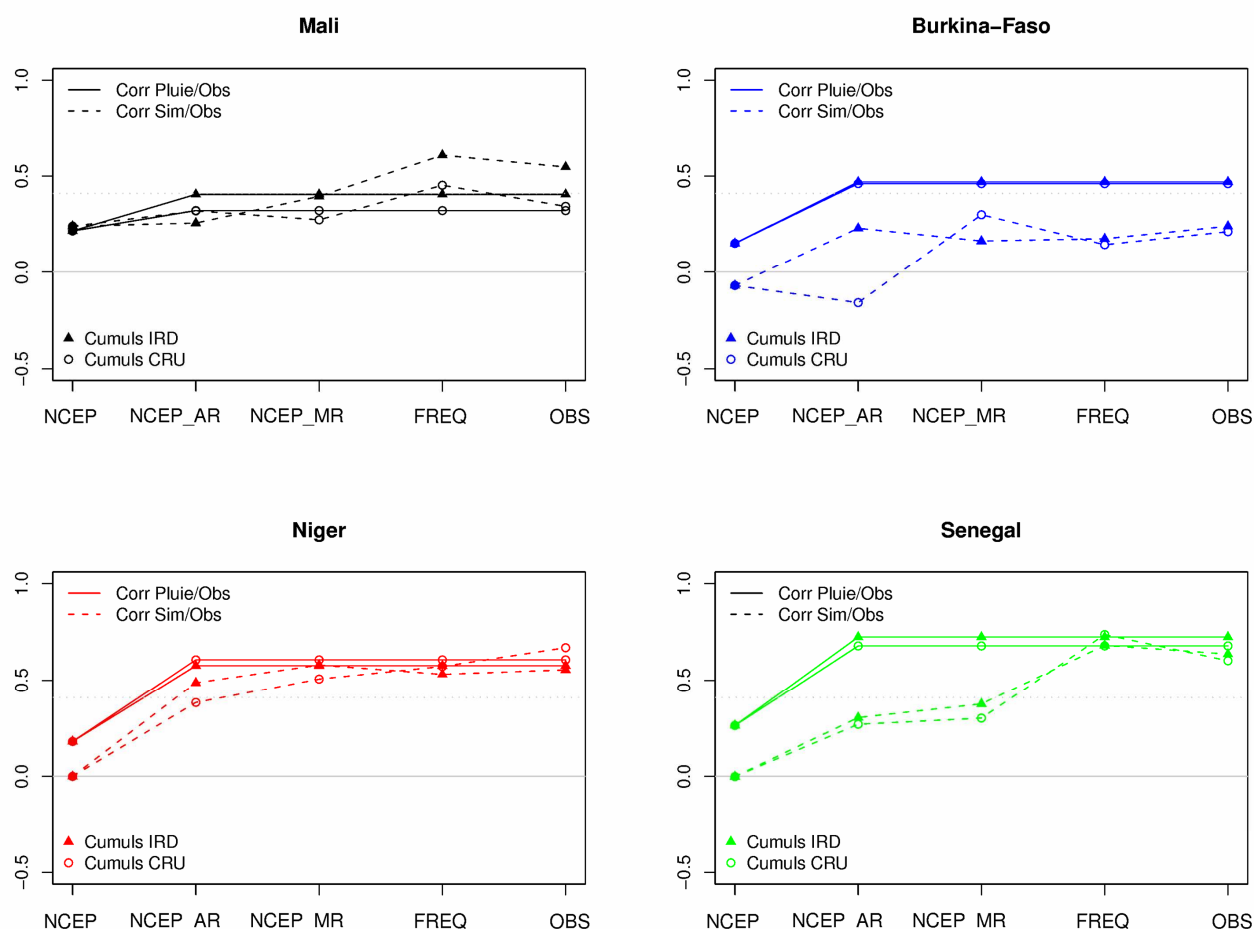


Fig.2.11 : Evolution du score du modèle (corrélations entre rendements observés et simulés – en tirets) et de la corrélation cumul de pluie annuel/rendements observés (traits pleins) dans les différents forçages de l'article (GRL) de la section 2. Se référer à l'article pour la définition des forçages et des simulations. Les ronds creux correspondent aux forçages où la correction du cumul annuel est faite avec les données CRU, les triangles pleins à ceux où la correction est faite avec les données IRD. Comme les forçages NCEP_AR, NCEP_MR, FREQ et OBS ont par construction, dans chaque cas (correction IRD ou CRU), le même cumul annuel (chaque année en chaque pixel), les corrélations pluie/obs sont les mêmes dans les 4 forçages.

5.1 Limites de la modélisation agronomique statistique à grande échelle

a. Stationnarité du climat

Tout d'abord, la corrélation constatée entre pluie et rendements n'est pas strictement équivalente au score du modèle : la première est constatée *a posteriori*, dans les observations, alors que le second est le résultat de la construction d'un modèle *a priori*. Autrement dit il faudrait comparer le score du modèle sur, par exemple, 1965-2000, avec le score d'une relation statistique construite sur une période en amont - par exemple 1930-1965 – qu'on extrapolerait à cette période (1965-2000). Ou encore comparer le score de la relation statistique définie ici, dans les deux articles présentés, sur 1965-2000, avec le score d'une simulation du modèle, sur 2000-2035. Bien entendu, si la corrélation observée entre pluies et rendements est stationnaire, le score de cette relation statistique resterait le même. Cependant, même sans considérer des facteurs non-climatiques qui pourraient causer une rupture de stationnarité (évolution des pratiques agricoles, développement de l'irrigation, par exemple), cette stationnarité n'est pas assurée. Si on peut supposer que pour des petites variations autour de l'état climatique moyen sur une période donnée, l'effet sur la variabilité des rendements

soit toujours le même, en cas de variations plus importantes cela peut n'être plus le cas. Par exemple, si une région connaissant un climat essentiellement aride se trouve devenir substantiellement plus humide, la relation entre cumul pluviométrique et rendement peut ne plus s'appliquer : en effet au-delà d'un certain niveau la pluviométrie cesse progressivement d'être le facteur limitant principal, et le gain de rendement selon l'accroissement de précipitation sature peu à peu – dans cet exemple. Autrement dit, une relation statistique n'est valable qu'autour d'un état climatique donné : supposant *de facto* une stationnarité dans la relation observée entre rendement et climat, elle aura du mal à rendre compte de l'effet de variations plus importantes, par exemple dans le cadre du changement climatique.

b. Prise en compte de l'effet CO₂

De même, une relation empirique entre climat et rendements aura du mal à rendre compte de l'effet de l'évolution de certains facteurs environnementaux – par exemple, ici, l'effet de l'évolution du taux de CO₂. En effet, une relation empirique définie sur la seconde moitié du XX^{ème} siècle, par exemple, intègre par construction l'effet d'une concentration de CO₂ entre 310 et 380 ppm. Mais la réponse des cultures au climat ne sera pas nécessairement la même dans une atmosphère à 500 ou 700 ppm : des taux plus élevés de CO₂ ont d'une part un effet fertilisant sur la végétation, et d'autre part augmentent l'efficacité d'utilisation de l'eau des plantes (quantité de CO₂ qui peut être assimilée pour une quantité d'eau perdue par transpiration). Ces deux effets peuvent significativement remettre en cause une projection qui ne serait basée que sur l'évolution du climat. Il faut admettre néanmoins que l'ampleur de l'effet fertilisant du CO₂ reste aujourd'hui encore mal cernée (Long et al. 2006, Tubiello et al. 2007, Ainsworth et al. 2008), et qu'en tout état de cause il concerne essentiellement les cultures en C3 et peu les cultures en C4, pour lesquelles le taux de CO₂ actuel est d'ores et déjà optimal. D'autre part, les auteurs utilisant des relations statistiques pour réaliser des projections d'évolution des rendements s'en tiennent souvent à l'horizon 2030, ou 2050, horizon auquel l'augmentation de CO₂ restera plus faible (Lobell et al. 2008, Schlenker et Lobell 2010) – même si le signal du changement climatique, en revanche, ne sera à cet horizon que très partiel.

On aura l'occasion, au chapitre III (section 2) de revenir sur ces aspects liés au CO₂ dans les projections d'impacts du changement climatique sur les rendements agricoles.

c. Qualité des données de rendements

Un autre point qu'on peut soulever dans cette comparaison entre simulations mécanistes et empiriques est que développer des relations statistiques fiables entre rendements et climat suppose de disposer de données climatiques et agricoles précises sur une période assez longue. Si des jeux de données climatiques tels que ceux du CRU couvrent aujourd'hui l'ensemble du globe sur le siècle dernier et permettent de définir assez facilement sur les dernières décennies des quantités climatiques annuelles agrégées spatialement, les seules données agricoles à grande échelle couvrant une période suffisamment longue sont les statistiques de la FAO. On a déjà eu l'occasion, dans les sections 1 et 2 de ce chapitre, de discuter de la précision de ces données, et de leur capacité à refléter avec fidélité, le cas échéant, l'impact de la variabilité climatique. Le simple aspect visuel des données peut parfois suffire à inspirer une certaine méfiance quant à leur réalisme (cas du Nigeria dans l'article de la section 1 de ce chapitre). Une rupture subite de stationnarité dans la relation observée entre climat et pluie peut également susciter des doutes (cas du Sénégal). Pour illustrer plus généralement ces problèmes, la figure 2.12 reprend les données FAO pour les rendements de mil de l'ensemble des pays africains. On peut facilement constater que pour un nombre important de pays, des ruptures de série (ex : Kenya), ou au contraire des plages de valeurs constantes répétées sur plusieurs années (ex : South Africa), affectent ces données.

Fondamentalement, la figure 2.12 montre que dans de nombreux cas la variabilité des rendements dans les données reportées par la FAO n'est pas d'origine climatique. Dans ces conditions, il est difficile d'établir des relations statistiques fiables entre rendements et climat pour tous les pays – et encore plus incertain de vouloir les extrapoler dans le futur.

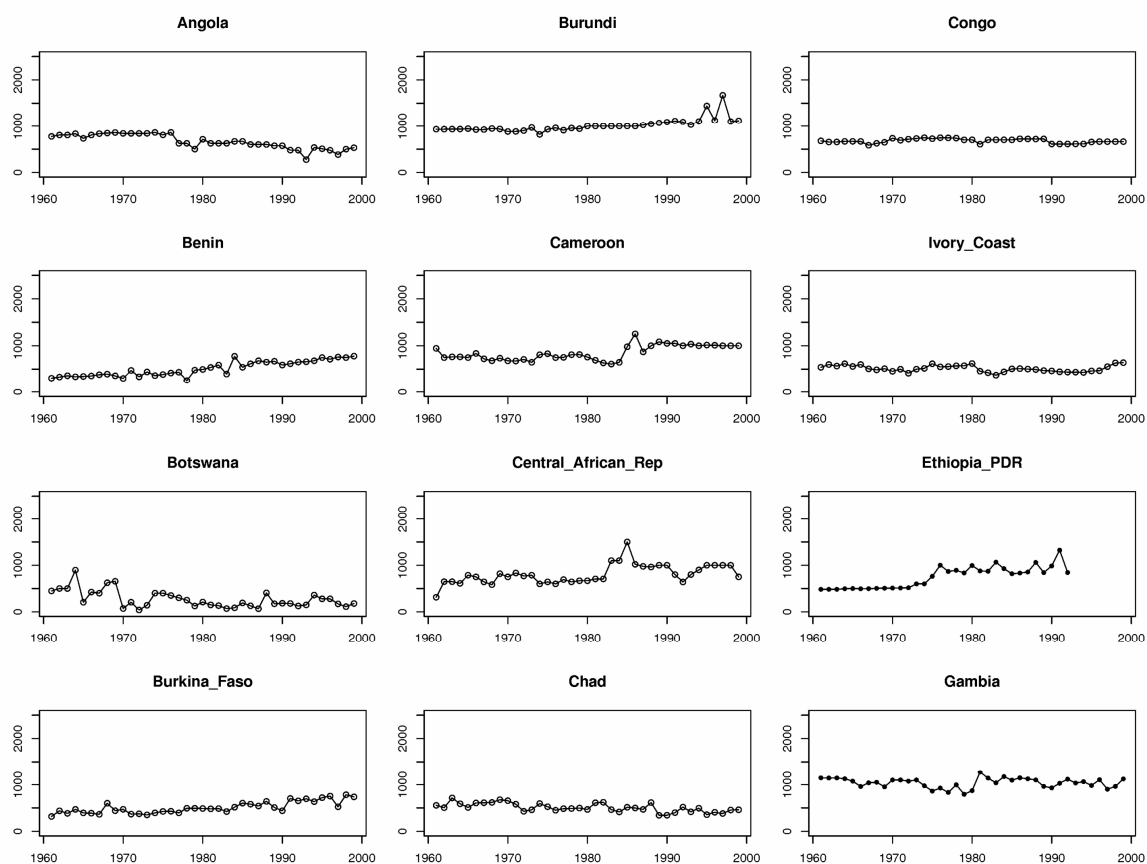


Fig.2.12, début : rendements FAO sur 1961-1999, en kg/ha, pour l'ensemble des pays africains.

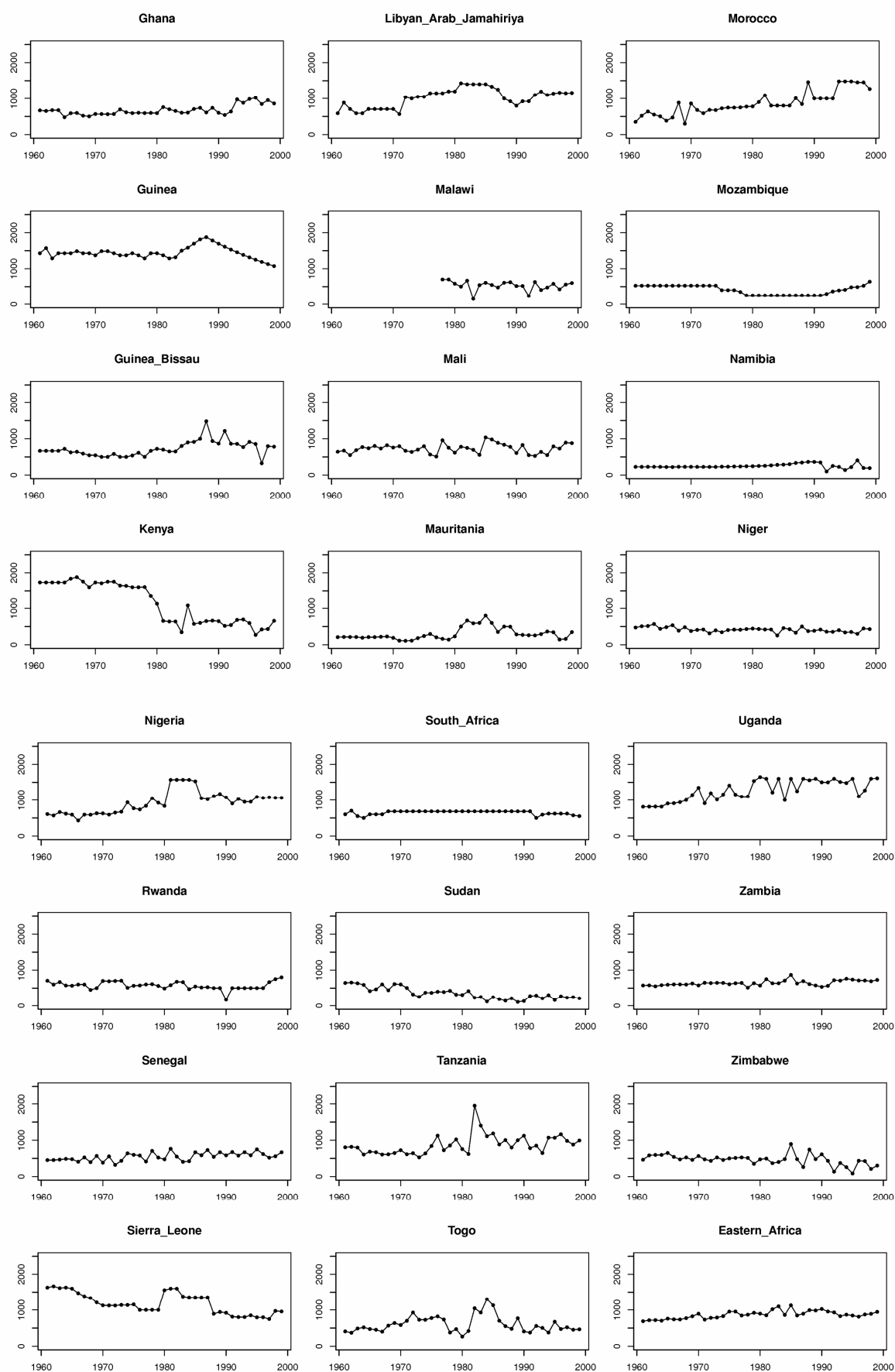


Fig.2.12, fin : rendements FAO sur 1961-1999, en kg/ha, pour l'ensemble des pays africains.

5.2 Modélisation agronomique mécaniste à grande échelle et prise en compte de la variabilité climatique intrasaisonnière

a. Avantages généraux de la modélisation mécaniste

Une modélisation mécaniste permet en théorie de pallier certains des inconvénients décrits ci-dessus. Tout d'abord, pour peu que les processus correspondants soient correctement décrits dans le modèle, celui-ci peut s'appliquer dans différents domaines climatiques et environnementaux (CO₂). Ainsi, on pourrait presque paradoxalement avancer que même si un modèle mécaniste rend un peu moins bien compte qu'une relation statistique de l'effet de la variabilité climatique sur les rendements, il inspirera davantage confiance au niveau des prévisions d'impact d'un changement climatique. D'autre part, il ne nécessite pas de longues séries de données fiables et précises pour être établi ; bien entendu, lorsque la variabilité des données observées n'est pas d'origine climatique, il reste inutile d'attendre du modèle qu'il parvienne à la simuler, et la validation du modèle est donc délicate. Enfin et surtout, au-delà de l'impact de variables climatiques agrégées (température moyenne ou cumul pluviométrique sur une saison de croissance, par exemple), un modèle mécaniste est en théorie capable de rendre compte de l'impact sur les rendements de la variabilité climatique intrasaisonnière. C'est un point important, dans la mesure où l'effet de la variabilité intrasaisonnière peut potentiellement surpasser l'effet du climat moyen saisonnier. C'est du moins le cas à l'échelle de la parcelle (Winkel et al. 1997). Par exemple au chapitre I section 3.3, on a vu qu'à Wankama en 2006, la pluie cumulée est largement supérieure à celle de 2005 ; cependant, du fait de la répartition particulière de ces précipitations, la biomasse produite (et, il est légitime de le supposer, le rendement) est inférieure à celle de 2005. Le modèle est, qualitativement, capable de reproduire cet effet ; une relation statistique basée sur le cumul pluviométrique aurait, en revanche, prévu l'inverse.

b. Importance de la variabilité climatique intrasaisonnière dans la simulation des rendements à grande échelle

- Afrique de l'ouest -

A plus grande échelle (pays, région), il n'est néanmoins pas évident que la prise en compte de la variabilité intrasaisonnière joue un rôle aussi important. Ainsi, dans la section 2 de ce chapitre, on a montré que la prise en compte de cette variabilité – utiliser la séquence réelle des pluies, au lieu d'une séquence respectant la même distribution statistique mais avec une séquence aléatoire - n'améliore pas le score du modèle sur l'Afrique de l'Ouest (différence entre simulation FREQ et OBS). L'interprétation présentée dans l'article est que cette variabilité intrasaisonnière ne montre pas de cohérence spatiale assez forte pour avoir un impact sur la précision de la simulation du modèle agrégée à l'échelle d'un pays. Autrement dit, du fait de son hétérogénéité spatiale, les erreurs dues à la non-prise en compte de la variabilité intrasaisonnière se compensent lorsque les différents pixels sont agrégés : si, par exemple, ne pas prendre en compte la variabilité intrasaisonnière résulte en une surestimation de l'anomalie de rendement simulée sur un vingtaine de pixels, et en une sous-estimation sur une vingtaine d'autres, alors l'agrégation de l'ensemble des pixels lissera l'erreur et fournira un résultat semblable à une simulation intégrant la vraie variabilité intrasaisonnière. Le cas contraire serait par exemple qu'au cours de la saison des pluies une séquence sèche se produise à peu près au même moment sur l'ensemble d'une région : l'impact de la prise en compte de cette variabilité saisonnière serait alors détectable à l'échelle du pays. Ce n'est pas ce qui semble se produire ici. Il est difficile de donner une mesure précise de la cohérence spatiale de la variabilité intrasaisonnière, et le sujet ne semble pas avoir été largement développé dans la littérature. Développer des métriques adéquates pour cela est probablement au-delà des objectifs de cette thèse - on peut toutefois en avoir un aperçu en calculant

simplement, par exemple, la corrélation spatiale entre les événements de pluie au sein de la saison des pluies (fig.2.13) : cette mesure suggère que la variabilité intrasaisonnière est faiblement cohérente spatialement sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest - sauf peut-être sur la région du Sénégal (toutefois dans ce dernier cas, il faut aussi garder à l'esprit qu'un jeu de données de pluies grillées fait généralement intervenir de l'interpolation pour spatialiser les données de pluviomètres : il n'est pas impossible que cette carte soit simplement en grande partie un artéfact de cette interpolation).

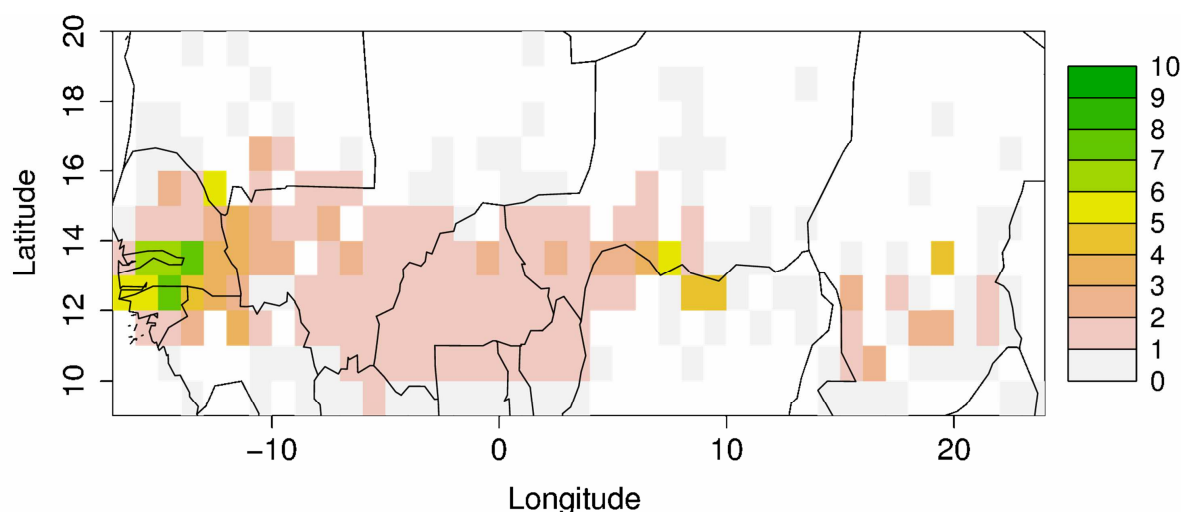


Fig.2.13 : Cohérence spatiale de la variabilité intrasaisonnière des pluies sur 1968-1990 en Afrique de l'Ouest, à partir du jeu de données de pluies journalières utilisé dans l'article GRL de la section 2 de ce chapitre. Pour chaque pixel, est représenté le nombre de pixels avoisinants pour lesquels les événements de pluies journaliers, en mettant bout à bout les 23 saisons des pluies (1968-1990), sont corrélés significativement.

- Comparaison Afrique de l'Ouest/Inde -

Il semble possible de proposer que l'impact de la prise en compte de la variabilité intrasaisonnière sur la performance du modèle dépende du poids de cette variabilité dans la variabilité climatique de la région considérée. La comparaison entre les résultats obtenus sur l'Inde et l'Afrique de l'Ouest vient conforter cette interprétation. En effet, on peut constater (tab.2.4 au début de cette section) que sur l'Inde, ORCHIDEE-mil parvient à mieux simuler la variabilité observée des rendements à grande échelle qu'une relation statistique simple basée sur le cumul pluviométrique saisonnier ($R=0.68$ et $R=0.59$), et que la relation était inverse pour l'Afrique de l'Ouest ($R=0.48$ et $R=0.63$). Or, la comparaison de la variabilité des pluies dans les deux systèmes de mousson montre que la variabilité de la mousson indienne est, relativement, plus importante à l'échelle intrasaisonnière (entre 0 et 60 jours) qu'en Afrique de l'Ouest (fig.2.14) ; inversement la variabilité interannuelle (365 jours) de la mousson est plus marquée en Afrique de l'Ouest qu'en Inde. Cette comparaison suggère qu'une modélisation mécaniste, intégrant l'échelle intrasaisonnière, donne en Inde de meilleurs résultats qu'une modélisation statistique basée sur des variables saisonnières parce que, précisément, la variabilité intrasaisonnière y joue un rôle plus important : un modèle mécaniste est capable de prendre en compte cette information. Inversement, sur l'Afrique de l'Ouest la variabilité de la mousson est plus forte à l'échelle interannuelle : un modèle statistique bâti sur des variables saisonnières peut alors donner de meilleurs résultats, et l'apport de la prise en compte de la variabilité intrasaisonnière est moindre.

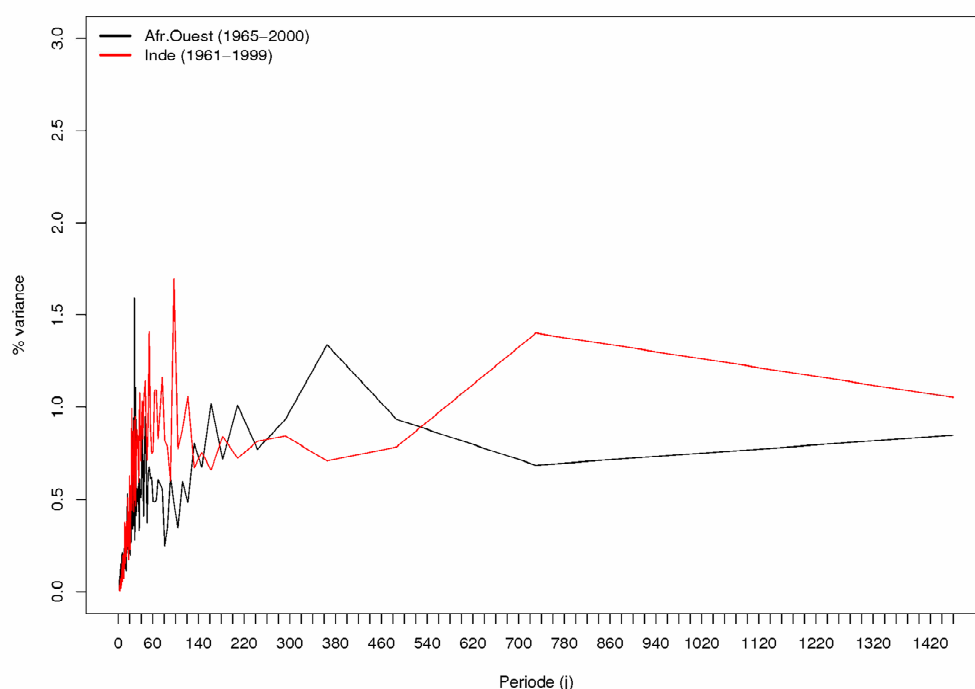


Fig.2.14 : Comparaison des spectres des pluies journalières (issues des données NCC) sur l'Inde et l'Afrique de l'Ouest. Sur chaque région, le cycle saisonnier moyen (sur les années considérées) a été retiré pour chaque pixel, les anomalies résultantes moyennées spatialement sur l'ensemble de la région de façon à obtenir une seule série pour l'ensemble de la région, puis plusieurs spectres ont été calculés par intervalles glissants de 4 ans. Le spectre présenté est la moyenne des spectres obtenus sur chacun de ces intervalles.

Il faut toutefois rester prudent sur cette interprétation, notamment du fait de la faiblesse des différences entre les scores des modèles statistiques et mécanistes sur chaque région. Là encore, il serait intéressant de répéter l'expérience de sensibilité de l'article de la section 2 sur l'Inde : cela permettrait de voir clairement si, comme supposé, la prise en compte ou non de la variabilité intrasaisonnière (la différence entre les simulations FREQ et OBS) a un impact sur le score du modèle sur cette région. Il serait également intéressant que d'autres groupes de modélisation testent leurs modèles sur les deux régions afin de voir s'ils reproduisent la différence de comportement présentée ici : une telle inter-comparaison permettrait de renforcer la robustesse de la présente analyse.

c. Effet de la résolution et limite de la précision du modèle

L'article de la section 2 avance en outre que l'effet de la prise en compte de la variabilité intrasaisonnière sur le score du modèle est également probablement dépendant de la résolution du modèle, c'est-à-dire de celle du forçage : en effet, de manière très simple, plus la résolution est basse, moins le nombre de pixels par pays est élevé, et moins les différences entre les simulations FREQ et OBS seront lissées. Les simulations seront davantage différentes - et donc le score du modèle également. Néanmoins, on peut nuancer ce point de vue : si la variabilité intrasaisonnière des pluies est effectivement faiblement cohérente spatialement, alors un forçage « parfait » à plus grande échelle, censé représenter la moyenne sur une maille plus grande, montrera théoriquement peu de différences entre un forçage incluant cette variabilité ou un forçage ne l'incluant pas. Autrement dit, moyenner spatialement la variabilité intrasaisonnière des pluies en amont, au niveau du forçage - au lieu de moyenner, en aval, les rendements simulés - fait disparaître dans tous les cas cette variabilité et son effet sur les rendements - encore une fois, si cette variabilité est hétérogène spatialement. Bien entendu, cela n'est vrai que si le forçage rend « parfaitement » compte du

climat à l'échelle considérée : au vu des difficultés qu'ont les modèles de climat à simuler correctement les pluies, ne serait-ce qu'en termes de distribution statistique, on ne peut réaliste ment attendre des forçages climatiques qu'ORCHIDEE-mil serait amener à utiliser d'être ainsi « parfaits ».

L'effet de la prise en compte de la variabilité intrasaisonnière des pluies sur la performance du modèle dans la simulation de la variabilité interannuelle des rendements à grande échelle dépend donc *a priori* du poids et de la cohérence spatiale de cette variabilité, et de la précision de sa représentation dans le forçage climatique à l'échelle considérée.

Résumé

Dans ce second chapitre, on a appliqué ORCHIDEE-mil à l'échelle régionale en zone tropicale (Afrique de l'Ouest, Inde), forcé par des observations climatiques. On a montré que les dates de semis étaient en moyenne correctement reproduites par le modèle (sur l'Afrique de l'Ouest). On a analysé la simulation des rendements à grande échelle par rapport aux données de la FAO. Le modèle reproduit correctement la distribution spatiale des rendements ; toutefois le rendement moyen simulé par le modèle est largement surestimé. Cette surestimation reflète en fait l'écart entre le rendement potentiel climatique, qui est celui simulé par le modèle, et le rendement réel en milieu paysan, qui résulte d'une conduite beaucoup plus extensive des cultures et est donc beaucoup plus faible. Cela souligne le besoin de prendre en compte dans le modèle le degré d'intensification des pratiques culturales.

Au-delà de ce biais moyen, on a montré que le modèle reproduisait bien la dépendance spatiale et temporelle au climat (ici, la pluie), et qu'à l'échelle régionale il parvenait à expliquer une part significative de la variance interannuelle observée des rendements : environ 25% et 46% de variance expliquée sur l'Afrique de l'Ouest et l'Inde, respectivement. La performance du modèle dépend de l'échelle considérée, et à l'échelle sous-régionale, en Afrique de l'ouest, elle varie selon le pays considéré : les corrélations entre rendements observés et simulés vont de 0.15 (Mali) à 0.53 (Burkina-Faso).

On a montré qu'une partie des erreurs du modèle dans la simulation de la variabilité interannuelle des rendements en Afrique de l'Ouest provenait du forçage climatique utilisé, et que les corrections de ces biais de forçage amélioreraient la performance du modèle. On a pu montré qu'à cet égard les caractéristiques déterminantes du forçage de pluie sur cette région étaient les caractéristiques temporelles (fréquence, intensité) davantage que la représentation de la variabilité intrasaisonnière (cycle saisonnier, séquences journalières des pluies). On a également discuté le rôle critique de la qualité des données de rendements de la FAO, qui à cette échelle (nationale) et dans ces régions présentent aussi des incertitudes fortes : si les données FAO ne sont pas assez précises (et ne reflètent pas l'impact de la variabilité climatique), alors la performance du modèle ne peut être évaluée de façon pertinente.

Au-delà du mil, on a montré que le modèle, à grande échelle, pouvait s'appliquer (dans les régions considérées) à l'ensemble des céréales C4 pluviales (mil, sorgho, maïs).

Enfin, on a discuté la difficulté, pour le modèle, à simuler la variabilité des rendements à grande échelle avec plus de précision qu'une relation statistique simple climat/rendement, et discuté des avantages respectifs de la modélisation mécaniste et statistique. Le fait qu'ici la modélisation mécaniste soit plus précise que la modélisation statistique en Inde, et l'inverse en l'Afrique de l'Ouest, est cohérent avec le poids plus important de la variabilité intrasaisonnière dans la mousson indienne que dans la mousson ouest-africaine.

III. Apport d'ORCHIDEE-mil à l'étude des interactions climat/agriculture

Dans ce chapitre on se propose d'utiliser ORCHIDEE-mil pour aborder les deux aspects de la double problématique climat/agriculture soulevés dans l'introduction : la rétroaction biophysique des zones cultivées sur le climat en région tropicale, et l'impact de l'évolution future du climat sur la productivité agricole, dans le contexte du réchauffement climatique.

Pour aborder le premier point, on se focalisera dans la première section sur la région ouest-africaine, en s'appuyant sur certains des résultats de l'article publié dans *Climatic Change* présentés dans le chapitre précédent.

Il a déjà été mentionné, en introduction, que l'Afrique de l'Ouest constitue une région privilégiée pour l'étude des interactions végétation/climat, à des échelles de temps allant de l'échelle intrasaisonnière à l'échelle paléoclimatique, d'une échelle locale à une échelle globale. Ainsi, de nombreuses études leur attribuent un rôle important aux échelles de temps séculaires: une rétroaction positive importante entre climat et végétation semble nécessaire pour expliquer les variations (expansion et récession) de la végétation au Sahara au cours de l'Holocène, pilotées par les variations d'insolation d'origine orbitale (Claussen et al. 1997, 1999, Brovkin et al. 1998, Renssen 1998, Foley et al. 2003). On peut noter cependant que l'idée d'une rétroaction biophysique forte entre végétation et climat Afrique de l'Ouest aux échelles paléoclimatiques a récemment été remise en question, sur la base d'études de modélisation, par Liu et al. (2007), et, sur la base de paléo-enregistrements lacustres, par Kröpelin et al. (2008).

A des échelles de temps plus courtes, la mousson ouest-africaine montre des variations décennales de grande ampleur - en particulier, au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, la sécheresse des années 1970 et 1980 (Dai et al. 1984) qui constitue le signal climatique le plus important à l'échelle globale sur cette période en termes de précipitations (Trenberth et al. 2007). Cette sécheresse prolongée a eu des conséquences dramatiques pour les populations locales, en particulier dans les régions sahéliennes, où la productivité des systèmes agropastoraux supportant ces populations dépend directement des pluies de mousson. Bien que la pluviométrie régionale se soit, depuis, améliorée, et que les données satellite indiquent depuis les années 1990 un « reverdissement » de la région sahélienne (Hermann et al. 2006), les conditions climatiques et environnementales ne sont pas revenues à leur niveau d'avant les années 1970.

Historiquement, il a d'abord été proposé une origine continentale et anthropique à cette assèchement régional, à travers l'« hypothèse de Charney » (Charney 1975) : la dégradation de la végétation par l'Homme (e.g., surpâturage, déforestation, expansion des zones agricoles) entraîne une hausse de l'albédo, qui provoque un refroidissement de la surface, une diminution de la convergence d'humidité, et donc une baisse des précipitations qui rétroagit positivement sur la dégradation de la végétation. Depuis, toutefois, le consensus scientifique sur les causes de cette variabilité décennale de la mousson s'est orienté vers le rôle majeur de la variabilité océanique : les expériences de modélisations « AMIP », i.e., dans lesquelles le modèle d'atmosphère est forcé par les températures de surface de mer observées sur les dernières décennies, parviennent d'une façon générale à reproduire la majeure partie (e.g., le signe et la tendance) des variations observées de la mousson africaine (Gianini et al. 2003, Lu et Delworth 2005, Hoerling et al. 2006). En particulier, les anomalies de température de surface dans le golfe de Guinée joue un rôle primordial sur l'intensité de la mousson et la pluviométrie en région soudano-sahélienne. Néanmoins, le forçage océanique n'est pas suffisant à lui seul pour expliquer la persistance et l'amplitude des anomalies de pluviométries, à l'échelle décennale : la dynamique de la végétation et la modification

anthropique du couvert végétal jouent à cet égard un rôle déterminant, en amplifiant la perturbation initiale d'origine océanique (Zheng et al. 1999, Wang et Eltahir 2000, Foley et al. 2003, Wang et al. 2004).

Le rôle du changement climatique global d'origine anthropique dans l'évolution récente du système de mousson, en amont de la variabilité océanique, reste, comme pour tout signal régional, difficile à déterminer : Held et al. (2005), à l'aide du modèle du GFDL, et Biasutti et Gianini (2006), analysant les modèles couplés CMIP3, avancent qu'une part significative de l'assèchement régional en Afrique de l'Ouest sur la fin du 20^{ème} siècle résulte du forçage anthropique des gaz à effet de serre et des aérosols - Biasutti et Gianini (2006) allant jusqu'à chiffrer cette influence à 30% de l'évolution récente ; à l'opposé, l'analyse de Hoerling et al. (2006), portant les mêmes modèles CMIP3, conclue, à l'aide d'une analyse d'attribution différente, que l'évolution de la mousson ouest-africaine est essentiellement d'origine naturelle. Au-delà du passé récent, l'évolution du système de mousson au cours des prochaines décennies dans le cadre du réchauffement global reste un « point aveugle » des projections climatiques : les simulations climatiques des différents modèles divergent entièrement, jusqu'au signe de l'évolution pluviométrique, sur l'Afrique de l'Ouest, certains modèles prévoyant un renforcement de la mousson, d'autres une diminution très marquée des pluies (Held et al. 2005, Cook et Vizy 2006, Douville et al. 2006, Christensen et al. 2007). Il faut ici rappeler, comme il a été souligné en introduction, que la quasi-totalité de ces projections climatiques, utilisées pour le rapport du GIEC, n'incluent pas l'évolution de la végétation sous l'influence du climat et, surtout, du fait des modifications anthropiques (e.g., déforestation, expansion des cultures). Or, étant donné l'augmentation de population attendue pour les prochaines décennies en Afrique de l'Ouest, et la pression environnementale qui en résultera inévitablement, les interactions végétation/climat anthropiques vont probablement être amenées à jouer un rôle dans l'évolution climatique régionale.

Dans ce contexte, nous avons voulu tester l'impact d'une meilleure représentation des zones cultivées sur les interactions surface/atmosphère et le climat en Afrique de l'Ouest.

1. Impact d'une meilleure représentation des zones cultivées sur le climat simulé par LMDz en Afrique de l'Ouest

1.1 Modifications des interactions surface/atmosphère dans ORCHIDEE-mil

Dans ORCHIDEE-mil, nous avons modifié la dynamique et la phénologie de la végétation cultivée : cela entraîne donc également une modification des propriétés biophysiques de la surface qui dépendent de cette végétation (albédo, efficacité d'évaporation, rugosité), et donc des interactions surface/atmosphère. Pour analyser l'effet sur ces processus d'une nouvelle simulation des zones cultivées dans ORCHIDEE, la même simulation que celle réalisée avec ORCHIDEE-mil dans l'article du chapitre précédent publié dans *Climatic Change* a été réalisée avec la version standard du modèle (ORCHIDEE): simulation sur 1965-2000, forcée par NCC, sur une fenêtre régionale (20-24°E ; 9-20°N). Dans cette version standard, les cultures sont approximées par des herbacées naturelles.

La figure 3.1 compare les valeurs annuelles moyennes (sur les 36 ans de simulation) d'albédo, de rayonnement net et de flux turbulents entre les deux simulations. En moyenne, l'albédo est légèrement plus fort dans ORCHIDEE-mil, et le rayonnement net par conséquent plus faible (de 1 à 10%). Les plus fortes différences s'observent pour le flux de chaleur latente, avec un

flux jusqu'à 25% plus faible en moyenne annuelle dans ORCHIDEE-mil. Cette diminution est en partie compensée par une augmentation du flux de chaleur sensible, de l'ordre de 5-10%.

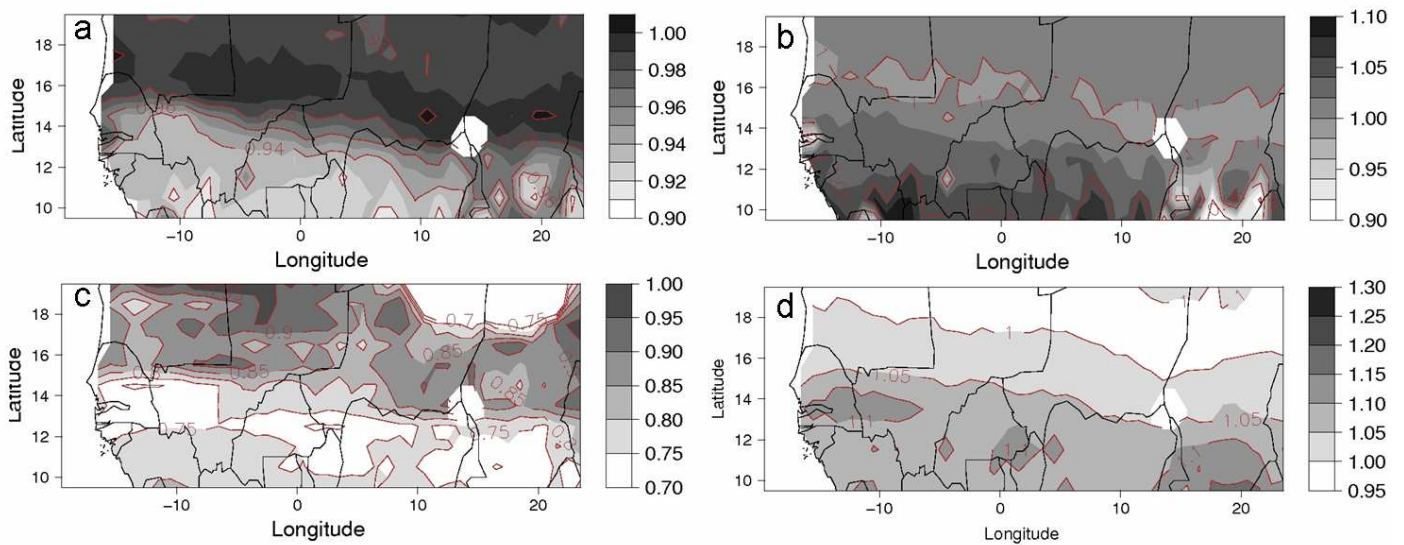


Fig.3.1: Rapport entre les valeurs annuelles moyennes (sur 1965-2000) issues des simulations d'ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE pour a) rayonnement net– b) albédo – c) flux de chaleur latente - d) flux de chaleur sensible. Par exemple pour a), est représenté « Rayonnement net moyen annuel d'ORCHIDEE-mil / Rayonnement net moyen annuel d'ORCHIDEE ».

Pour analyser plus avant l'origine de ces différences, les cycles saisonniers moyens de la végétation et des différentes variables biophysiques, sur les 36 années de simulation et sur la zone géographique où les différences sont maximales ($-2 : 7^{\circ}\text{E}$, $12 : 14^{\circ}\text{N}$), sont représentés sur la figure 3.2. On peut voir que le cycle saisonnier de végétation est moins ample et plus court dans ORCHIDEE-mil (fig.3.2a, pointillés). Ici le fait de moyenner spatialement et temporellement les pixels lisse le signal et fait disparaître la récolte en tant que telle dans le cycle moyen d'ORCHIDEE-mil. Du fait de ce cycle saisonnier plus court, la transpiration foliaire, et donc l'évapotranspiration (i.e., le flux de chaleur latente), se trouvent réduites en fin de cycle (fig.3.2a, traits pleins). L'écart maximum de flux de chaleur latente, à cette période, atteint -68 W.m^{-2} (i.e. une différence d'évaporation par jour de 2.4 mm), et sur la période septembre-décembre, la différence relative de cumul de flux de chaleur latente atteint -45% (i.e., 135 mm d'eau évaporée en moins). Cette absence d'évaporation provoque alors une augmentation du flux sensible (fig.3.2b). Comme l'albédo augmente en fin de cycle (la végétation est alors remplacée par du sol nu, dont l'albédo est plus élevé), le rayonnement net diminue (fig.3.2d), si bien que l'augmentation de flux sensible ne compense pas entièrement la baisse de flux latent. Toutefois, cette hausse de flux sensible augmente la température du sol de façon significative, jusqu'à 4 K (fig.3.2f). Le raccourcissement du cycle de végétation modifie aussi le bilan hydrique : moins d'eau étant évaporée en fin de saison, il en reste davantage dans le sol au cours de la saison sèche qui suit, et d'année en année le contenu en eau est en moyenne supérieure dans la version « mil ».

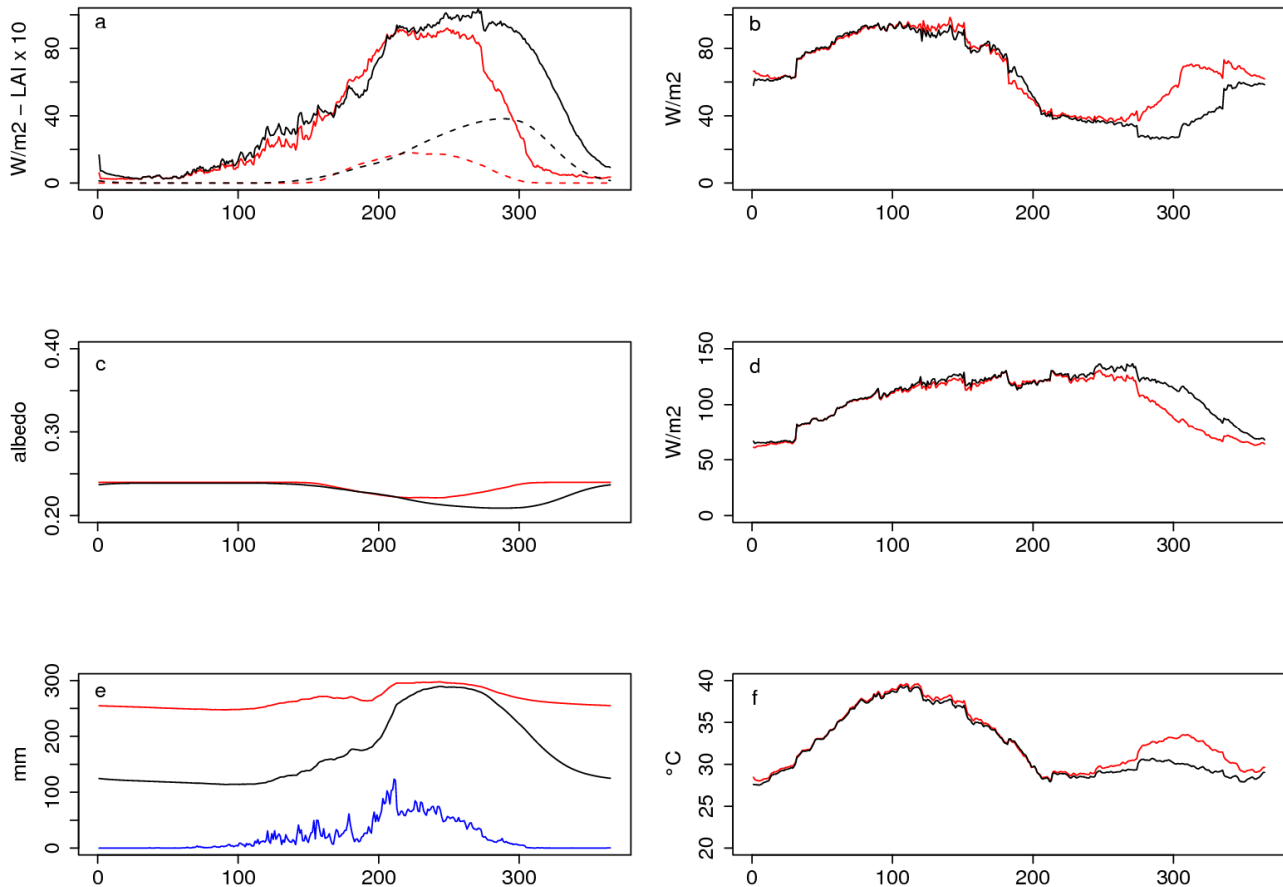


Fig.3.2: Cycle saisonnier moyen (sur 36 ans) sur un sous-domaine de 2°W-7°E / 12°-14° N pour ORCHIDEE-mil (rouge) et ORCHIDEE (noir), pour a) flux de chaleur latente (traits pleins) et LAI, multiplié ici par un facteur 10 (tirets) – b) flux de chaleur sensible – c) albedo – d) rayonnement net – e) contenu en eau du sol, et pluie (bleu) multipliée par un facteur 10 – f) température du sol.

En résumé, les différences en termes de flux surface-atmosphère entre ORCHIDEE-mil et ORCHIDEE résultent principalement d'un cycle saisonnier plus court : en dehors du semis qui est contraint par l'arrivée des premières pluies, la phénologie simulée des cultures est davantage contrainte par des facteurs non-climatiques (durée du cycle, récolte), alors que celle de la végétation naturelle simulée par ORCHIDEE reflète davantage un contrôle par la saison des pluies. Ceci explique notamment le gradient de différence observé sur la figure 3.1 : les différences entre cultures et herbacées augmentent aux basses latitudes. Nous n'avons dans cette section considéré que la simulation d'ORCHIDEE-mil correspondant à une variété de 90 jours : la durée du cycle est donc probablement trop courte aux basses latitudes (où des variétés à cycle plus long sont utilisées en réalité), et les différences présentées ici légèrement surestimées. La figure 3.1 reproduite avec une variété de 120 jours produit essentiellement les mêmes résultats (par exemple une réduction du flux latent de 20% au lieu de 25% - fig.3.3). Il faut préciser ici que les différences de flux surface-atmosphère simulées entre ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil ne correspondent pas nécessairement aux différences réelles, observées, entre végétation naturelle et cultivée (herbacées et mil). Tout d'abord ORCHIDEE, ici, simule des herbacées naturelles, mais les simulations correspondantes ne sont pas nécessairement réalistes par rapport à la végétation herbacée réelle (c'est d'ailleurs pour cela que la version ORCHIDEE-savannah, mentionnée au chapitre I, est développée). D'autre part, on a vu au chapitre I section 3, que la saisonnalité des flux surface-atmosphère observée sur la parcelle cultivée de Wankama était au final peu différente de celle observée sur le site de jachère, et

qu'ORCHIDEE-mil avait tendance à surestimer cette différence en ne représentant que du mil. Par conséquent, certaines des différences simulées ici entre ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil ne sont pas réalistes au regard de la comparaison entre les données observées sur les sites de mil et de jachère de Wankama. Si on retrouve bien ici, dans les simulations, le cycle saisonnier de végétation moins ample et plus court sur la végétation cultivée, en revanche l'effet simulé de la plus grande brièveté du cycle sur les flux turbulents en fin de saison (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente) n'est pas réaliste au regard des observations du site de Wankama (chapitre I section 3.5). En effet on a vu que sur ce site l'évaporation était au contraire légèrement plus importante sur le site de mil en fin de saison que sur le site naturel (au contraire de ce qui est simulé ici). Bien qu'il ne s'agisse que d'un seul site dans un environnement particulier, cela remet en cause, sur cet aspect, le réalisme des différences végétation cultivée/naturelle simulées ici par ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil.

L'effet sur l'eau du sol simulé ici (fig.3.2.e) est qualitativement réaliste : Ramier et al. (2009) rapportent des observations similaires sur le site de Wankama, où le contenu en eau du sol en fin de saison des pluies est supérieur sous le mil au contenu sous la végétation naturelle. Néanmoins les quantités d'eau absolues mises en jeu ici sont clairement surestimées, puisqu'on peut constater que dans ORCHIDEE-mil le sol reste quasiment à saturation même à travers la saison sèche.

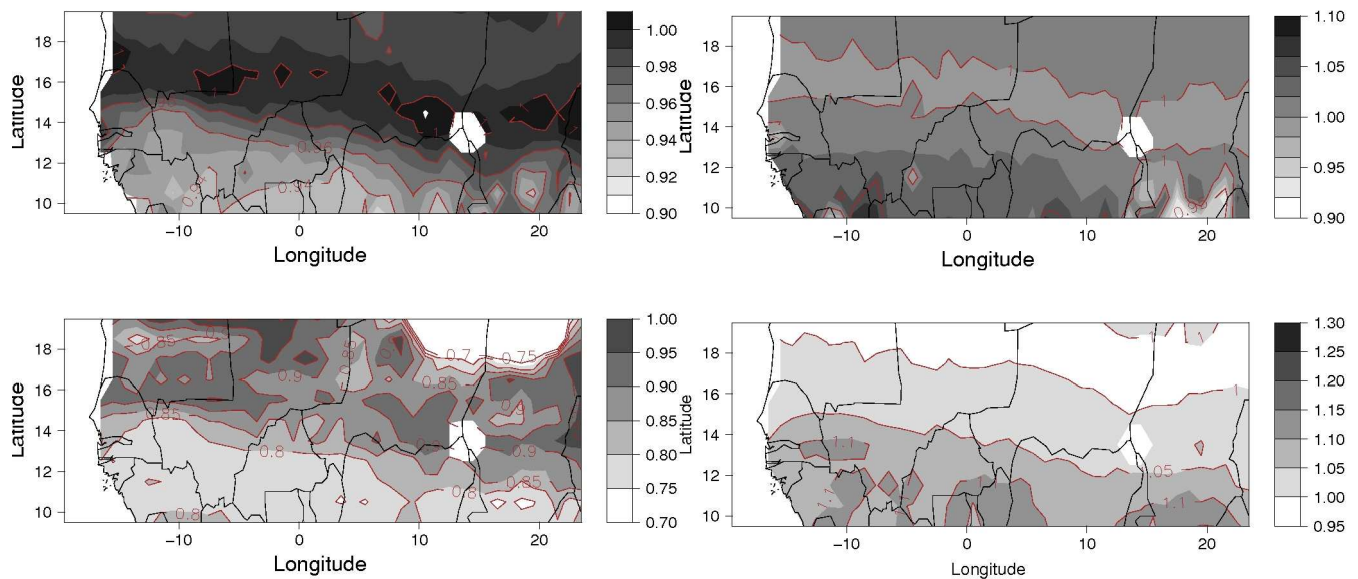


Fig.3.3: idem figure 3.1, pour la simulation avec un cycle plus long (2060 degré.jours, soit autour de 120 jours).

1.2 Couplage asynchrone avec LMDz

L'article publié dans *Climatic Change*, dans le chapitre précédent, n'allait pas au-delà des différences de flux surface-atmosphère présentées dans la section précédente, et tentait d'en discuter qualitativement les implications pour les conditions climatiques et la dynamique du système de mousson. Pour étudier plus avant l'impact sur le climat des modifications de végétation et de flux surface-atmosphère simulés, il faudrait dans l'absolu renouveler les simulations précédentes (ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil) dans une version du modèle couplée avec le modèle d'atmosphère LMDZ (Hourdin et al. 2006). Un tel couplage n'a pas

été réalisé au cours de cette thèse : néanmoins une expérience de couplage asynchrone a été menée pour tenter d'apprécier l'impact climatique biogéophysique d'une représentation plus réaliste des zones cultivées.

Etant donné que les différences mil/herbacées simulées par ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil ne sont pas complètement réalistes (cf section 1.1), il faut préciser que cette expérience ne vise pas à analyser l'impact biogéophysique réel sur le climat d'une modification d'usage des sols en Afrique de l'Ouest (e.g., expansion des zones cultivées au détriment de la végétation naturelle) : on s'intéresse ici à l'impact d'une nouvelle représentation des zones cultivées dans le modèle de surface sur le climat simulé par le modèle d'atmosphère. Dans cette expérience, les sorties journalières de LAI des simulations précédentes ont été, pour chaque simulation (cultures, herbacées), moyennées annuellement afin d'obtenir, pour chaque pixel du domaine de simulation, un cycle saisonnier climatologique de LAI. Il s'agit donc dans chaque cas d'une climatologie de LAI simulé forcée par le climat observé (NCC). Ces cycles de LAI ont ensuite été implémentés, au niveau de l'Afrique de l'Ouest, dans la carte de LAI mensuel lue par LMDZ-OR, le modèle couplé surface-atmosphère de l'IPSL, pour réaliser deux simulations : une dans laquelle les conditions de surface sur l'Afrique de l'Ouest sont celles d'herbacées, une pour laquelle ce sont celles des cultures. Dans ces simulations, la végétation n'est, donc, pas calculée de façon interactive: à chaque point de grille, le cycle saisonnier moyen de LAI est lu, chaque année, sur la carte de végétation. Chaque simulation est globale, à une résolution de $3.75^\circ \times 2.5^\circ$, sur 30 ans, avec des températures de surface de mer prescrites climatologiques. Les 15 dernières années de simulation sont analysées.

Comme dans de nombreux modèles de climat (Cook et Vizy 2006), la mousson ouest-africaine dans la version de LMDZ utilisée ici (intermédiaire entre celle utilisée pour les simulations du 4^{ème} rapport du GIEC et celle mise au point pour les simulations du 5^{ème} rapport) n'est pas correctement représentée : ici le système de mousson ne remonte pas assez à l'intérieur des terres, comme on peut le voir sur la figure 3.4. Il y a donc un biais sec dans le modèle au niveau du domaine considéré lors des simulations avec ORCHIDEE et ORCHIDEE-mil. Etudier l'impact sur le climat de modifications de la végétation dans cette zone ne serait pas pertinent, et mènerait à sous-estimer l'impact éventuel de telles modifications – notamment sur le cycle hydrologique.

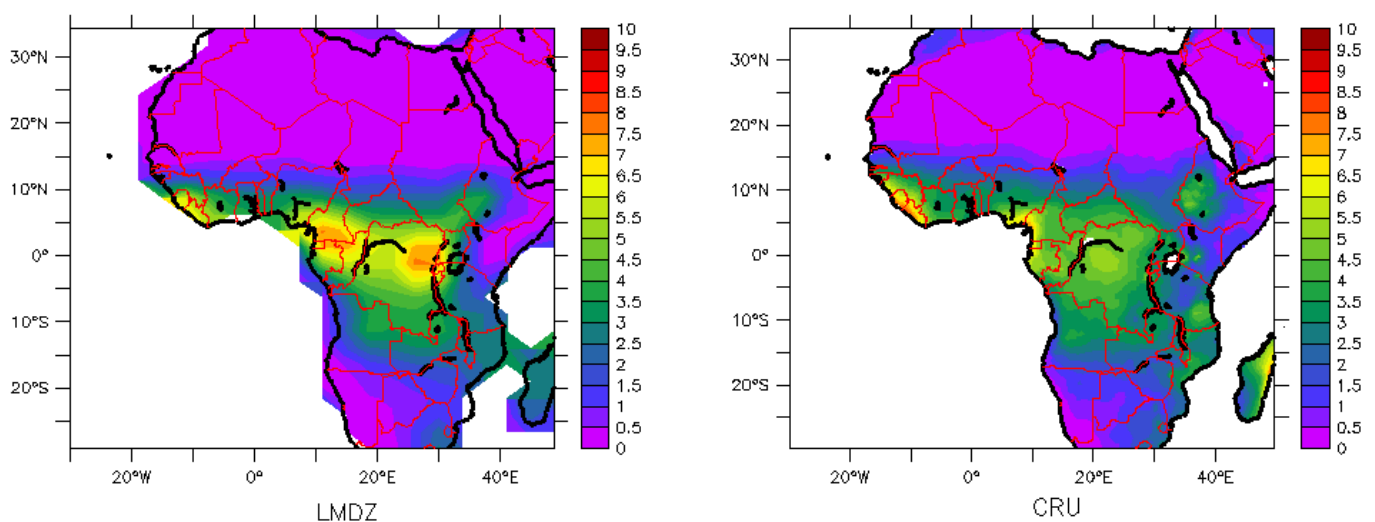


Fig.3.4 : Pluie moyenne annuelle, en mm/jour, sur l'Afrique dans les simulations de LMDZ avec des températures de surface de mer climatologiques prescrites (gauche), et dans les observations du CRU pour 1951-2000 (droite).

On prescrit donc les cycles saisonniers de LAI, dans la simulation « naturelle » et la simulation « cultivée », plus au Sud que leur localisation dans les simulations découplées (cf section précédente) - en pratique dans un domaine où les isohyètes de pluies simulées par LMDZ correspondent environ au même domaine climatique que dans les simulations découplées (fig. 3.5). Sur ce domaine, la carte de végétation est modifiée pour n'indiquer la présence que du PFT 12, plantes agricoles en C4 (fig.3.5): on maximise ainsi l'impact potentiel dans le modèle d'une différence de végétation, herbacées ou culture, en Afrique de l'Ouest. Partout ailleurs, la carte de végétation standard reste identique dans les deux simulations.

Toutefois, la résolution de la simulation globale étant bien plus faible que celle de la carte de végétation et celle de la carte de LAI, ces deux dernières ont été, lors des simulations, réagréguées automatiquement à la même résolution que le modèle : par conséquent les fractions de PFT 12 effectivement vues par le modèle d'atmosphère sont celles de la figure 3.6, où on peut voir que les zones marginales ont été « diluées » par le fait de faire la moyenne avec les zones adjacentes.

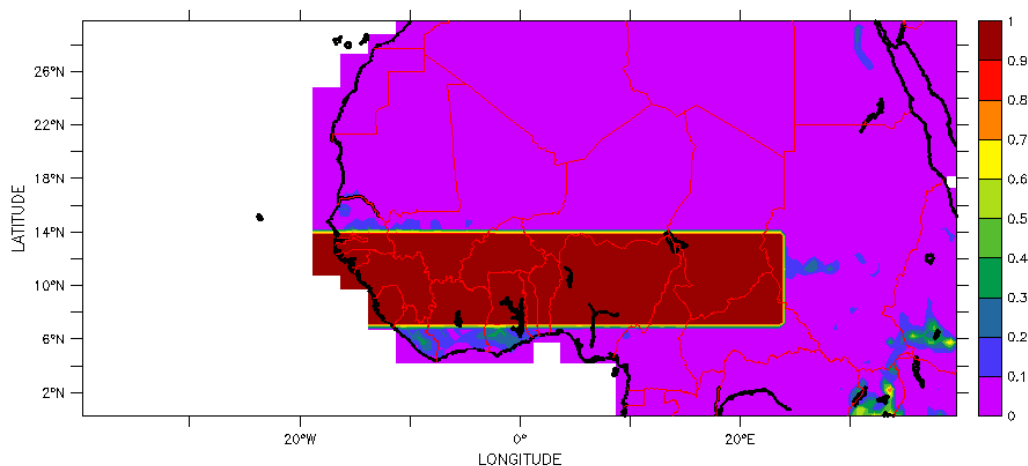


Fig.3.5 : Fractions de pixel de la carte de végétation à $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ consacrées au PFT 12 (cultures en C4). Dans la boîte centrale où cette fraction est de 1, le cycle saisonnier de LAI est prescrit comme étant soit celui d'une zone cultivée, soit celui d'herbacées naturelles. En dehors de la zone rectangulaire, les fractions de végétation et les données de LAI sont celles utilisées usuellement par ORCHIDEE (Loveland et al. 2000). Attention, on zoome ici sur l'Afrique de l'Ouest, mais les simulations sont globales.

Les figures 3.7 à 3.13 présentent successivement les différences entre les deux simulations, d'abord en termes de LAI – ce qui correspond donc à la perturbation apportée au modèle -, puis pour les variables calculées par le modèle : transpiration, évaporation du sol nu, évaporation totale, flux de chaleur sensible, température, pluie. Les différences sont présentées sous forme de cycles saisonniers moyens (en moyenne sur les 15 dernières années de simulation) sur un échantillon de 9 pixels couvrant la zone d'étude en longitude et latitude. La figure 3.7 montre qu'en termes de LAI, la différence entre les simulation « naturelles » et « cultures » décroît avec la latitude : on retrouve là la différence soulignée dans la section 1.1 entre végétation naturelle et cultivée. A la limite nord du domaine, la contrainte posée par la brièveté de la saison des pluies fait qu'il n'y a pas ou peu de différence entre végétation cultivée et naturelle. De même la différence entre les deux types de végétation décroît vers le l'extrême Est du domaine, du fait du gradient zonal pluviométrique légèrement négatif (en quantité et en durée de saison des pluies) d'Ouest en Est, notamment entre les longitudes 0° et 20°E (cf.fig.3.4).

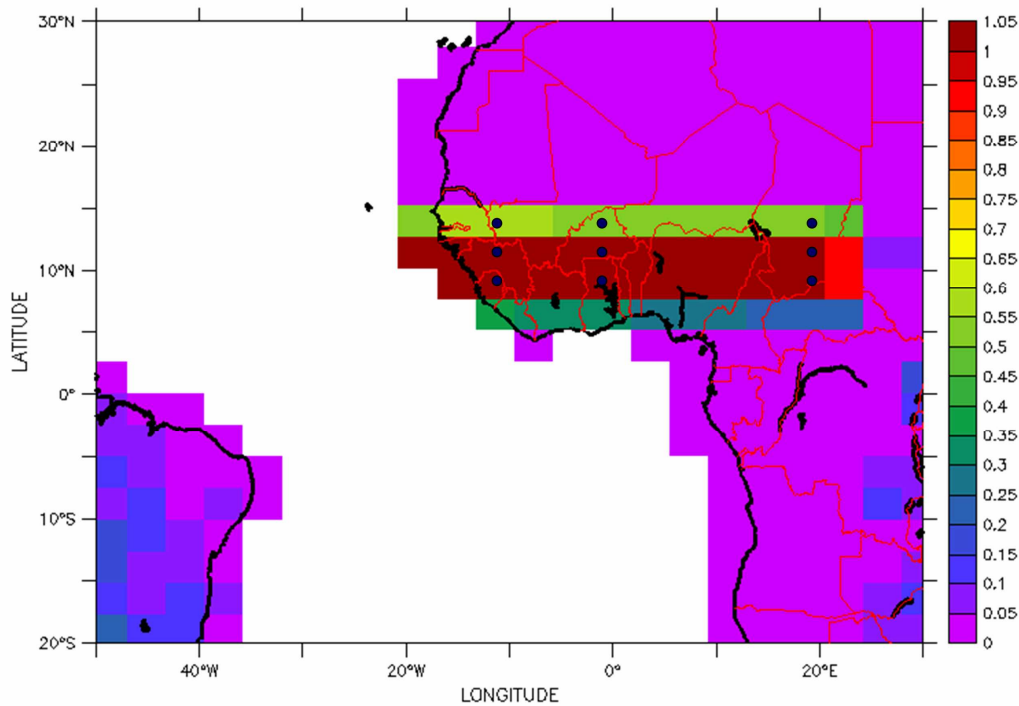


Fig.3.6 : Fractions de pixel de la carte de végétation consacrées au PFT 12 (cultures en C4) et effectivement lues par LMDZ-OR, à la résolution du modèle. Dans la boîte centrale sur l'Afrique de l'Ouest le cycle saisonnier de LAI est prescrit comme étant soit celui d'une zone cultivée, soit celui d'herbacées naturelles. Les 9 points noirs indiquent les pixels représentés dans les figures 3.7 à 3.13.

En dehors de la zone rectangulaire, les fractions de végétation et les données de LAI sont celles utilisées usuellement par ORCHIDEE (Loveland et al. 2000). Attention, on zoome ici sur l'Afrique, mais les simulations sont globales.

Cette perturbation des conditions de surface (cycle de LAI), imposée au modèle LMDZ-OR, se transmet directement à la transpiration (fig.3.8): celle-ci dépendant de la végétation, les différences de LAI génèrent des différences de transpiration. Cependant, lorsque le cycle de végétation s'interrompt dans la simulation « cultures », l'évaporation du sol nu prend, distinctement, le relais de la transpiration (fig.3.9) – avec pour résultat une différence d'évaporation totale (transpiration et évaporation du sol) entre les deux simulations bien inférieure à la différence de LAI imposée (fig.3.10). Cette faible différence d'évaporation est insuffisante pour générer une différence significative de recyclage de l'eau et de précipitation moyenne (fig.3.13). La hausse de flux sensible qui compense la légère baisse de flux latent (fig.3.11) entraîne, en revanche, une légère hausse des températures de surface lors de la fin de la saison des pluies, de 1 à 2 K au maximum (fig.3.12).

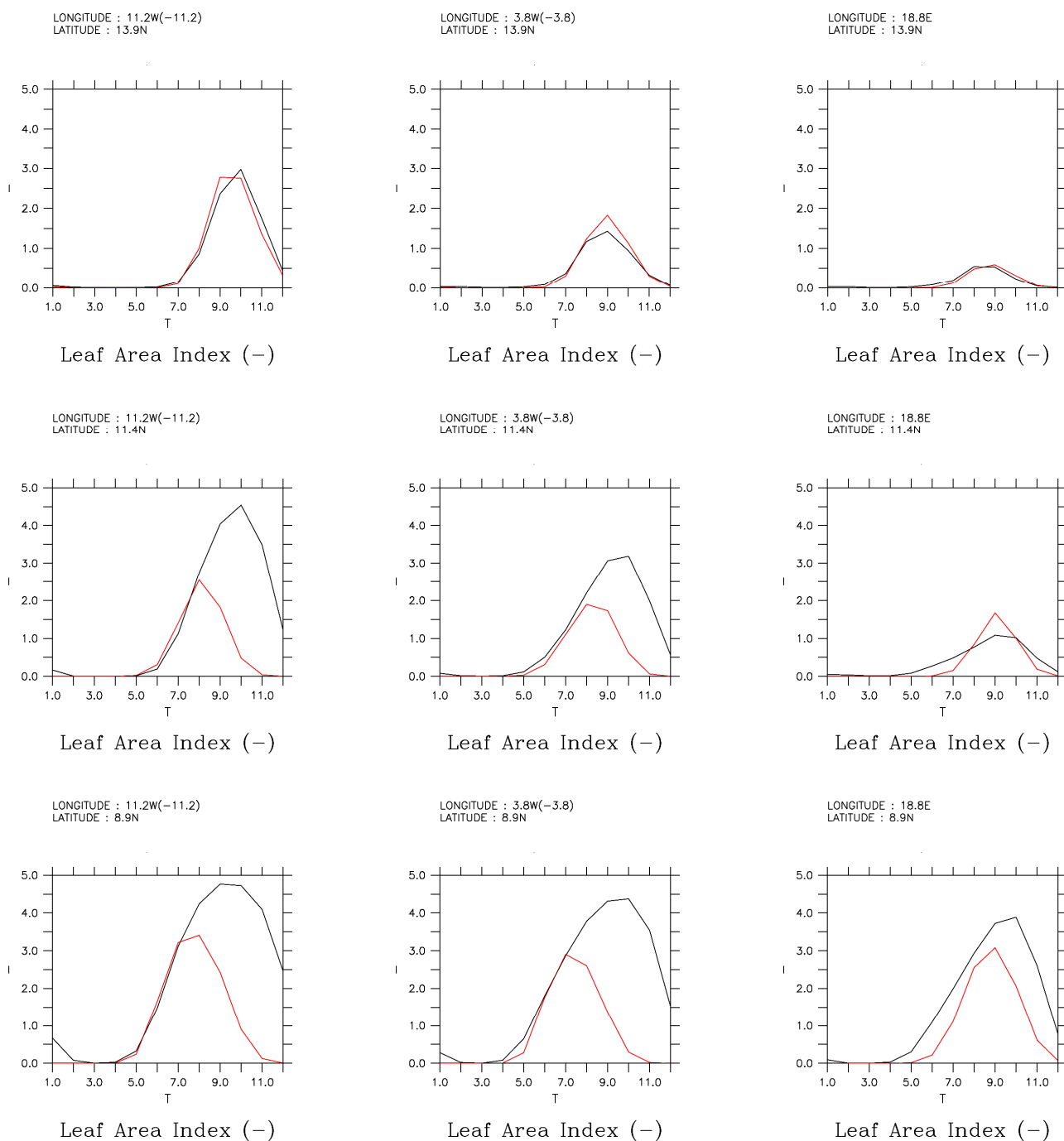


Fig.3.7 : cycle saisonnier de LAI lu par LMDZ-OR dans la simulation avec herbacées naturelles (noir) ou avec cultures (rouge), sur un échantillon-exemple de 9 pixels rangés par latitude croissante (de bas en haut) et longitude croissante (de gauche à droite)

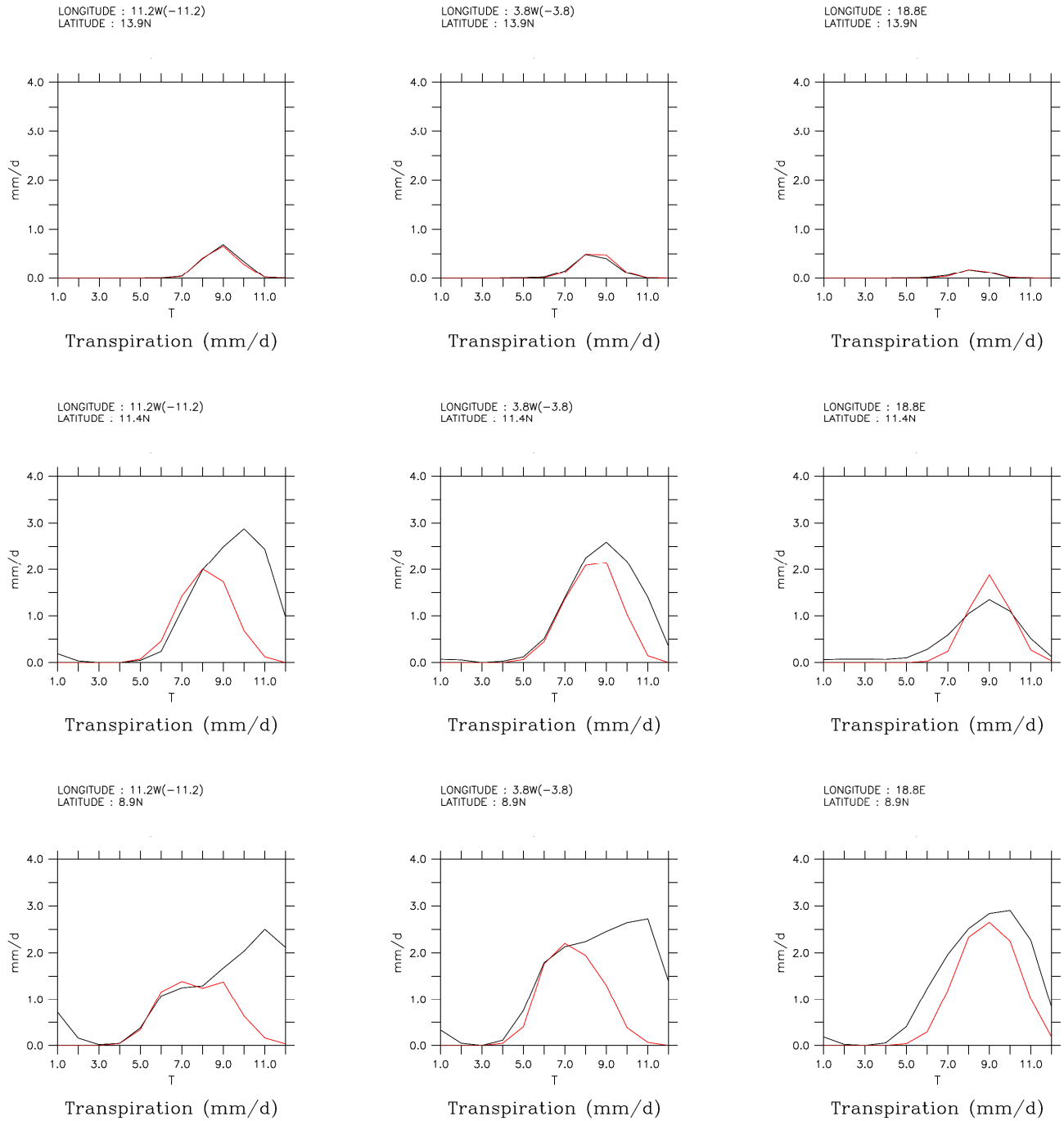


Fig.3.8 : cycle saisonnier de transpiration simulé dans la simulation avec herbacées naturelles (noir) ou avec cultures (rouge), sur un échantillon-exemple de 9 pixels rangés par latitude croissante (de bas en haut) et longitude croissante (de gauche à droite)

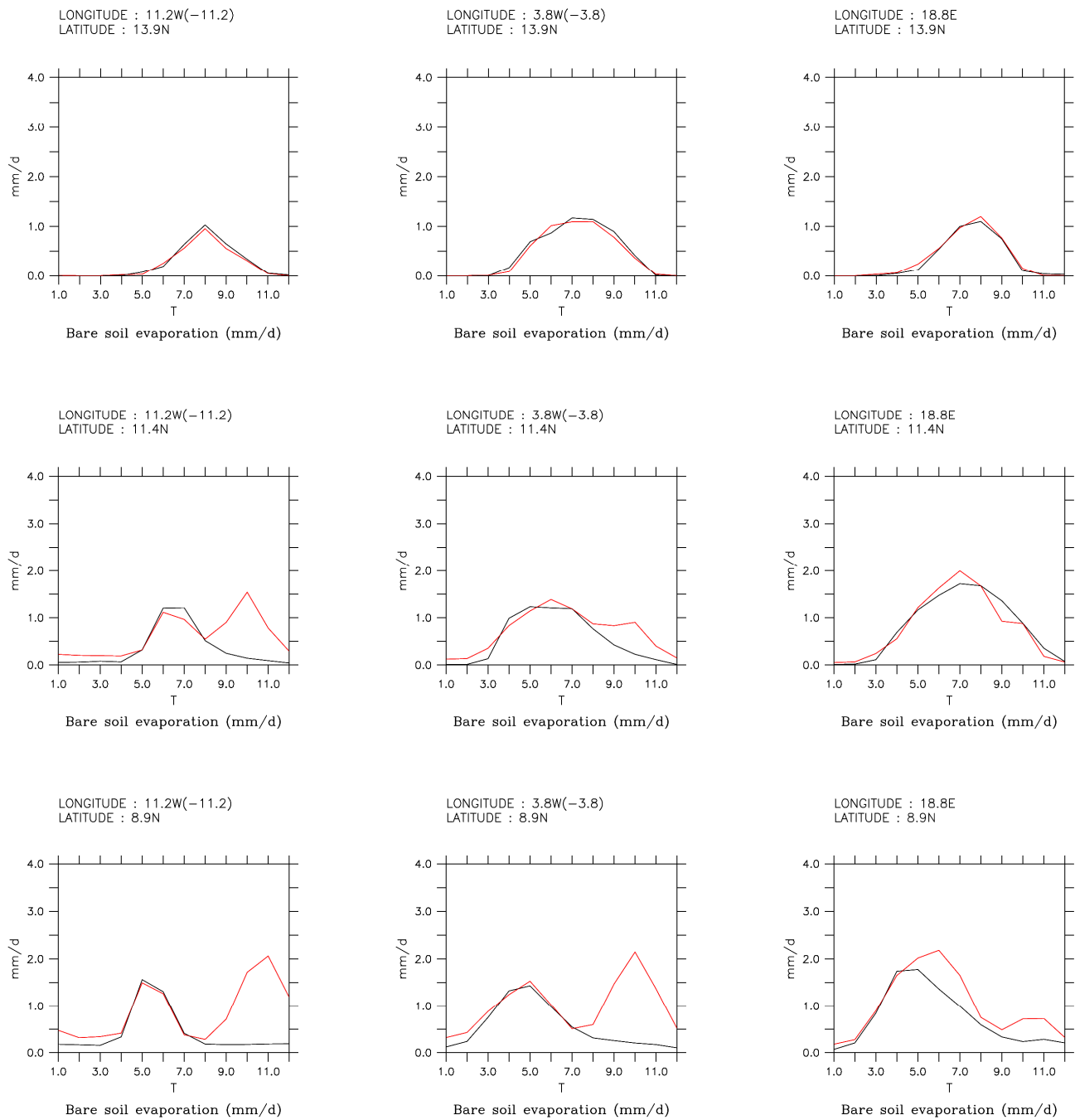


Fig.3.9 : cycle saisonnier d'évaporation du sol nu simulé dans la simulation avec herbacées naturelles (noir) ou avec cultures (rouge), sur un échantillon-exemple de 9 pixels rangés par latitude croissante (de bas en haut) et longitude croissante (de gauche à droite)

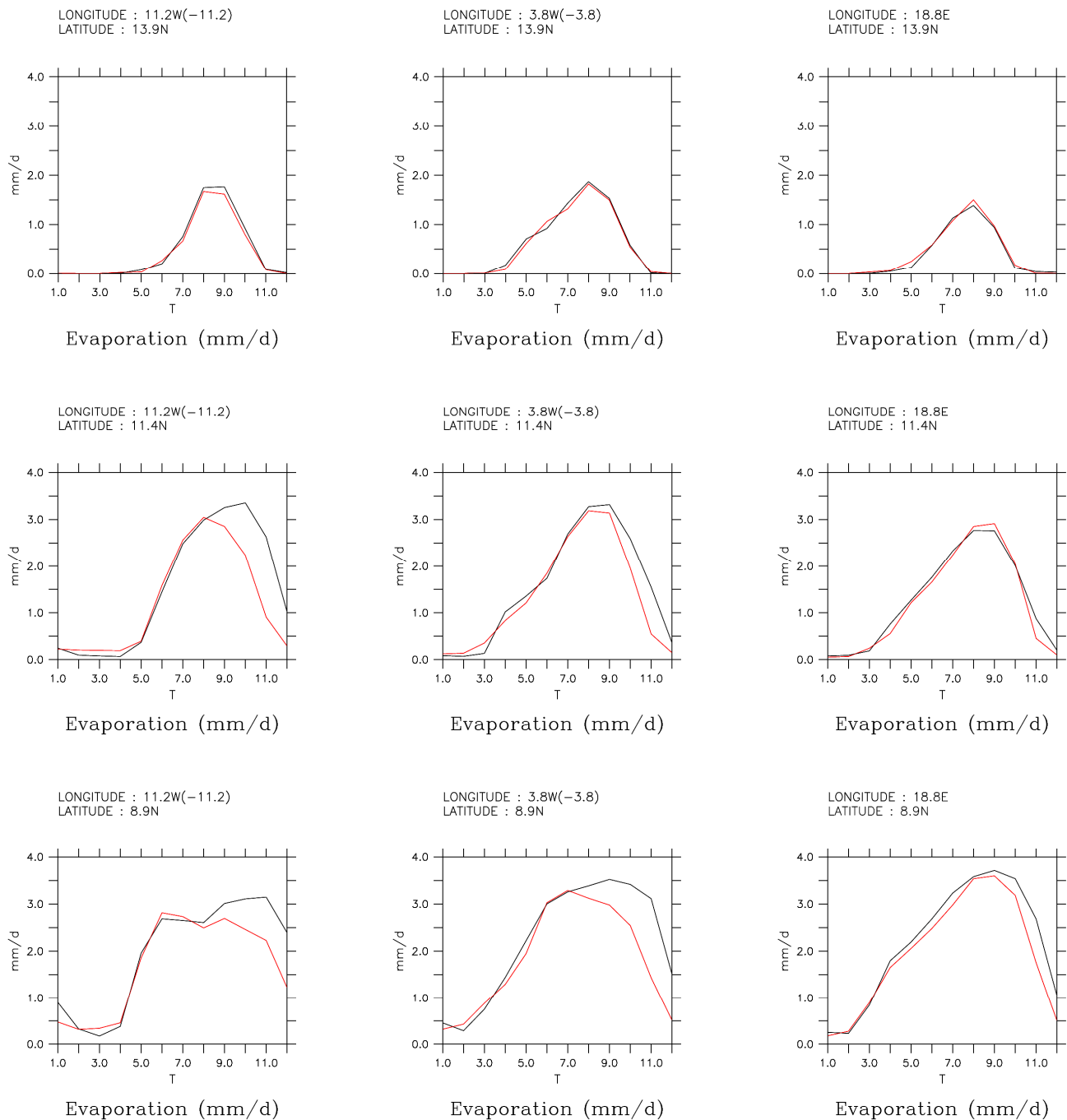


Fig.3.10 : cycle saisonnier d'évaporation totale simulé dans la simulation avec herbacées naturelles (noir) ou avec cultures (rouge), sur un échantillon-exemple de 9 pixels rangés par latitude croissante (de bas en haut) et longitude croissante (de gauche à droite)

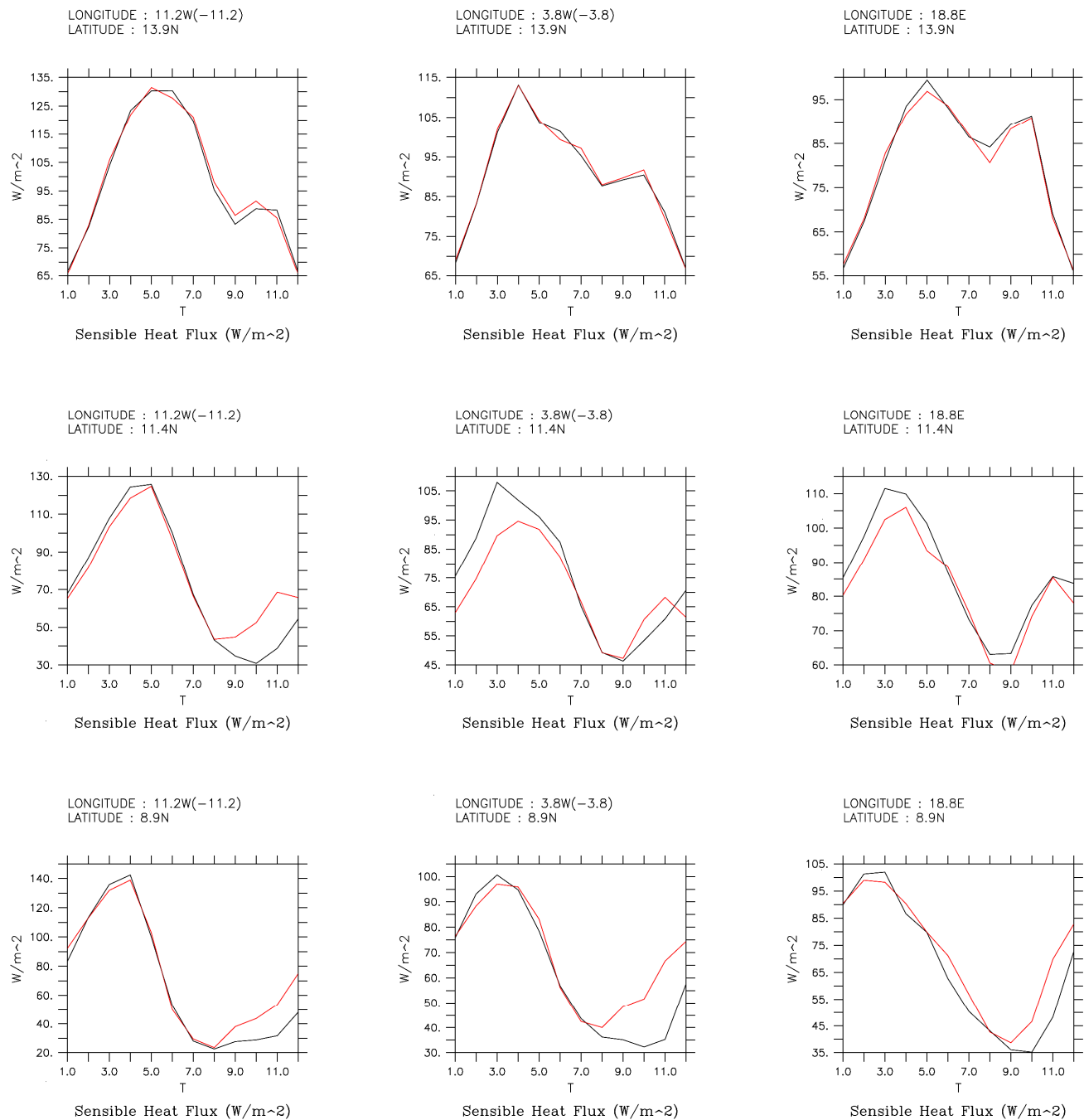


Fig.3.11 : cycle saisonnier de flux de chaleur sensible simulé dans la simulation avec herbacées naturelles (noir) ou avec cultures (rouge), sur un échantillon-exemple de 9 pixels rangés par latitude croissante (de bas en haut) et longitude croissante (de gauche à droite)

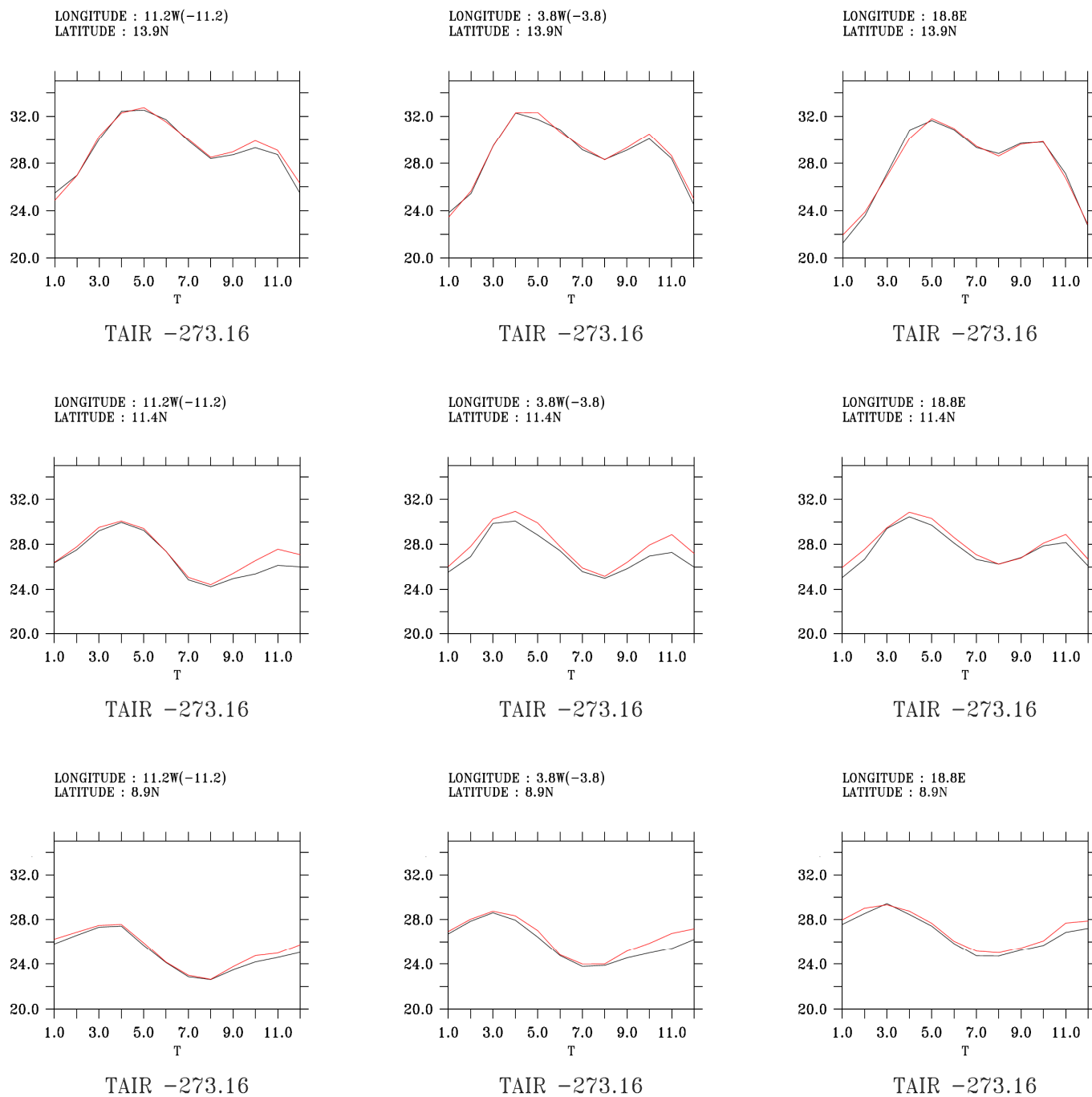


Fig.3.12 : cycle saisonnier de température de surface simulé dans la simulation avec herbacées naturelles (noir) ou avec cultures (rouge), sur un échantillon-exemple de 9 pixels rangés par latitude croissante (de bas en haut) et longitude croissante (de gauche à droite)

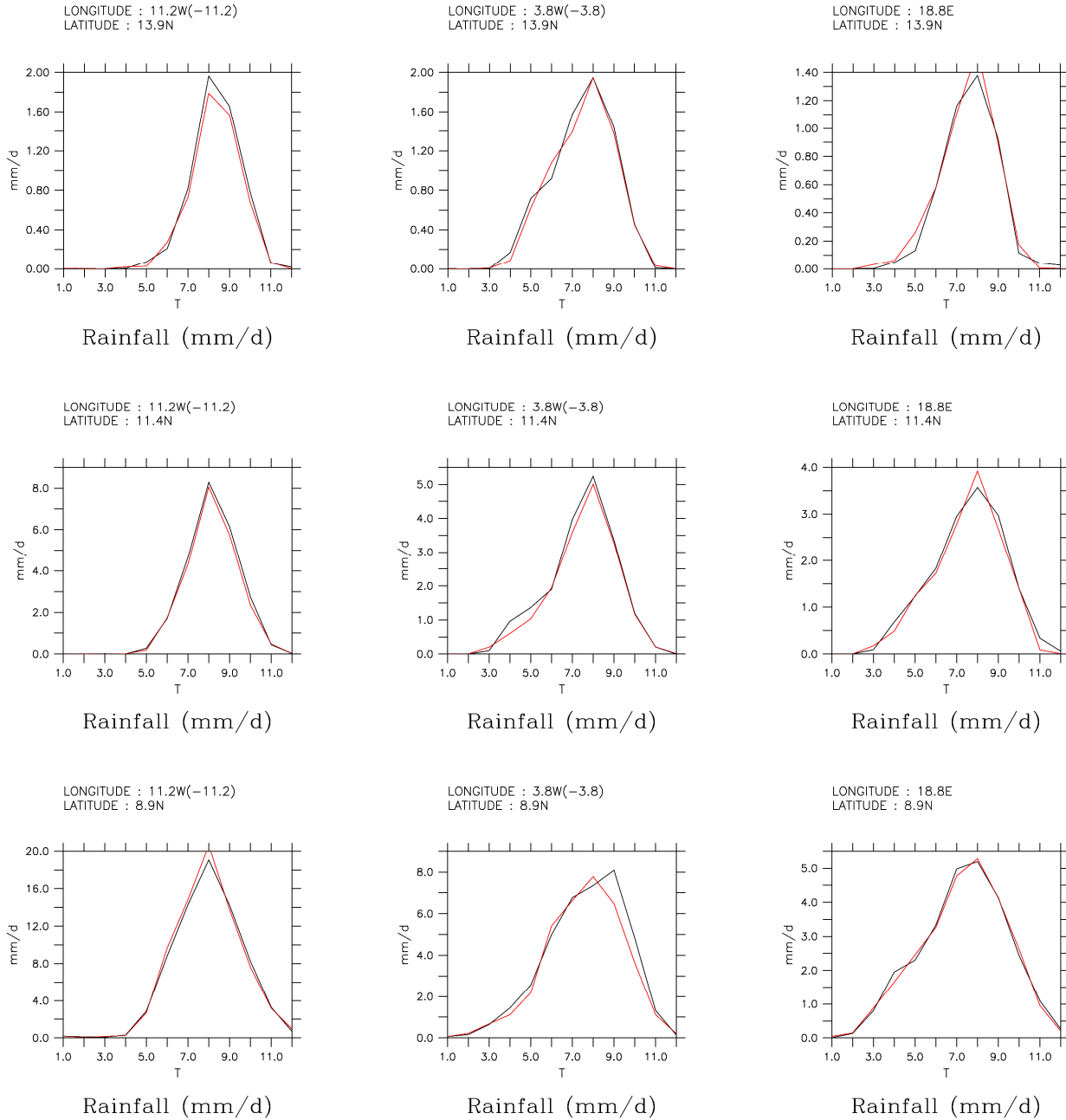


Fig.3.13 : cycle saisonnier de précipitation simulé dans la simulation avec herbacées naturelles (noir) ou avec cultures (rouge), sur un échantillon-exemple de 9 pixels rangés par latitude croissante (de bas en haut) et longitude croissante (de gauche à droite)

Cette expérience suggère donc qu'une représentation a priori plus réaliste des zones cultivées n'a que peu d'impact, dans le modèle, sur les conditions climatiques et aucun sur la dynamique de mousson. En particulier on n'observe ici aucun impact sur la pluviométrie simulée. Ce dernier point provient vraisemblablement en partie de la capacité de l'évaporation du sol nu, dans le modèle couplé, à prendre le relais de la transpiration de la végétation.

Il faut noter qu'on a ici idéalement maximisé les différences cultures/herbacées en prescrivant une fraction de PFT 12 de 100% sur le domaine d'étude. Ainsi, si on imagine une expérience de modélisation plus réaliste visant, par exemple, à étudier l'impact de l'expansion réelle des zones de cultures sur le climat régional d'Afrique de l'Ouest, dans laquelle les zones agricoles

ne représenteront donc qu'une fraction de la surface totale utilisée ici (voir figure 4 de l'article du chapitre II section 1.1 par exemple), alors il semble clair, si l'on en croit l'expérience menée dans cette section, qu'approximer la végétation agricole par des herbacées naturelles n'aurait que peu d'impact sur l'estimation de la réponse climatique. L'absence de réponse significative dans cette première expérience idéalisée de sensibilité sur l'Afrique de l'Ouest ne nous a donc pas incité à poursuivre dans cette voie : la suite du travail s'est davantage orientée vers l'utilisation du modèle à plus grande échelle dans un contexte d'étude d'impact du changement climatique sur la productivité agricole (voir section suivante).

Toutefois, il convient ici de nuancer l'absence de réponse significative dans ces simulations et de ne pas en tirer de conclusions générales, car cette expérience de sensibilité en couplage asynchrone souffre de limites importantes, en particulier concernant l'échelle de la perturbation (i.e., la prescription de conditions de surface différentes dans les deux simulations) :

- la zone sur laquelle on impose une perturbation et l'intensité de cette perturbation (des différences de cycles de LAI portant sur quelques mois au plus), est au final très faible dans le contexte de simulations globales réalisées à relativement basse résolution ;
- l'intensité de la perturbation doit aussi être considérée relativement à la sensibilité du modèle aux conditions de surface et du degré de couplage, dans le modèle, entre la surface et l'atmosphère sur la région considérée : si la dynamique de mousson n'est dans le modèle pas du tout dépendante des conditions de surface, alors même une perturbation importante de ces conditions n'aurait pas d'impact sur la simulation de la mousson. LMDZ exhibe bien une dépendance de l'atmosphère aux conditions de surface, mais qui apparaît lorsqu'on effectue des expériences de sensibilité plus drastiques, telle que couper le lien entre évaporation et eau précipitable dans le modèle (F.Hourdin, *pers. comm.*) ;
- la faiblesse de la perturbation résulte aussi de la méthodologie employée : on a moyenné des cycles saisonniers de LAI pour obtenir un cycle climatologique ; ce cycle climatologique lisse donc, on l'a vu (fig.3.2), le signal anthropique, i.e. la récolte et la conversion du couvert végétal au sol nu. Qui plus est, de même que sur la fig.3.6 la fraction de PFT 12 sur les pixels à basse résolution au bord de la zone d'étude sont en fait une moyenne entre les fractions prescrites à 100% et les pixels adjacents sur la carte de végétation à haute résolution, les cycles de LAI vus par le modèle d'atmosphère dans la simulation « cultures » sur ces mêmes pixels sont en fait une moyenne des cycles agricoles et des cycles d'herbacées des pixels adjacents : la différence ainsi prescrite entre les deux simulations, « cultures » et « herbacées » s'en trouve donc d'autant réduite. On peut s'en convaincre en considérant par exemple les pixels les plus au nord du domaine sur la fig.3.7.

Etant donné ces limitations, l'absence de réponse en termes de dynamique atmosphérique sur la région considérée n'est pas surprenante. De plus, il est également possible que le couplage surface-atmosphère atténue, intrinsèquement, les différences de flux de surface entre les deux simulations. En effet, dans les simulations forcées par NCC, le forçage atmosphérique ne « voit » pas la végétation : il n'intègre donc pas les modifications de conditions de surface entre les deux simulations. En revanche dans les simulations couplées, l'atmosphère répond à ces modifications. Il est alors possible que l'altération des conditions atmosphériques qui en résulte modifie les flux surface-atmosphère (qui sont en partie pilotés par le climat), de façon à atténuer les différences de flux entre les deux simulations. Par exemple, suite à la baisse de LAI post-récolte dans la simulation « mil », la température de surface augmente dans la simulation couplée, ce qui va avoir tendance à augmenter la demande évaporative –

l'évaporation qui en résulte sera alors supérieure à celle qui aurait eu lieu dans une simulation non-couplée.

Enfin, on a vu que l'absence de réponse hydrologique dans ces simulations provient essentiellement de ce que l'évaporation du sol nu compense l'absence de transpiration en fin de saison. Il est possible de questionner le réalisme de ce comportement, c'est-à-dire le fait qu'une zone dépourvue de végétation, dans l'environnement étudié ici, puisse évaporer dans des proportions comparables à une zone avec un couvert végétal. Dans la simulation LMDZ-OR, cet effet trouve son origine à la fois dans la représentation de l'évaporation dans le schéma de surface et dans la représentation des pluies dans le modèle d'atmosphère : en effet le biais sur la représentation des pluies par le modèle d'atmosphère, i.e. générer des pluies trop faibles et continues (biais commun des modèles de climat), favorise l'évaporation au niveau du sol.

Il serait possible d'améliorer cette première expérience de sensibilité, par exemple en utilisant une version de LMDz « zoomée » sur l'Afrique de l'Ouest, i.e. à plus haute résolution sur la zone d'étude – voire en utilisant un modèle régional. On peut aussi noter qu'on a ici uniquement considéré des variables climatiques moyennes : le diagnostic pourrait aussi porter sur des années particulières de simulation, où les différences de conditions de surface aurait un impact sur la dynamique de la mousson cette année-là (par exemple une année de mousson particulièrement intense, ou particulièrement faible). Enfin, une des limites du couplage asynchrone est qu'on prescrit des cycles saisonniers de LAI constants (d'année en année) : il est possible que l'impact d'une différence de conditions de surface apparaisse plus nettement dans le cadre d'une modélisation couplée avec végétation interactive. En effet fonctionner en végétation interactive rajoute un degré de liberté supplémentaire dans l'expérience, qui pourrait faire ressortir davantage de différences entre les simulations : toutefois cela supposerait de coupler ORCHIDEE-mil au modèle d'atmosphère.

Fondamentalement, ces résultats ne constituent pas donc une preuve de l'absence d'impact d'une meilleure représentation des zones cultivées sur le climat simulé en région tropicale dans un modèle couplé végétation/climat : sans tenir compte des limitations de l'expérience menée ici, un tel impact dépend aussi du modèle considéré et de la région considérée. En particulier on peut penser que dans des régions où la différence prescrite entre végétation herbacée et végétation agricole serait plus prononcée, l'impact sur le climat serait plus important.

A cet égard, on peut noter les résultats de Costa et al. (2007) et Sampaio et al. (2007), qui montrent tous deux, à l'aide de simulations couplées végétation/atmosphère, qu'en Amazonie, la baisse de pluviométrie résultant d'une déforestation régionale massive est plus prononcée lorsque la forêt est remplacée dans le modèle par des cultures de soja que lorsqu'elle est remplacée par des pâturages. Costa et al. (2007) rapportent par exemple, en utilisant le modèle couplé CCM3-IBIS dans une configuration assez semblable à celle utilisée dans notre expérience, des diminutions de précipitation de -3.9% et -15.7%, pour une déforestation à 75% avec conversion en prairies, ou en cultures, respectivement (voir fig.3.12). On peut noter que sur cette zone d'étude, leur expérience leur permet de maximiser la différence entre végétation cultivée et herbacée en termes de LAI (fig.3.13) : le cycle saisonnier de soja est extrêmement court, alors que le LAI herbacé est constant au cours de l'année. Il faut préciser que dans cette expérience le LAI est calculé pour les forêts et les herbacées, mais prescrit d'après des observations sur site pour le soja. Sans même considérer le degré de sensibilité aux conditions de surface du modèle atmosphérique utilisé dans leur expérience, ces résultats illustrent l'importance de la zone d'étude pour l'analyse de l'impact climatique de la différence herbacée/cultures.

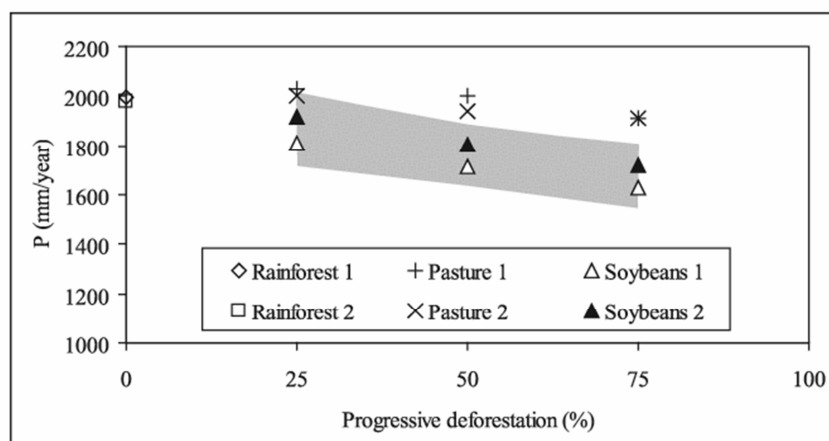


Fig.3.12 : baisse de précipitation sur l'Amazonie dans l'expérience de Costa et al. (2007) en fonction du pourcentage de déforestation considéré et du type de changement de végétation. Les termes 1 et 2 se réfèrent à des valeurs d'albédo légèrement différentes choisies pour chaque type de végétation. La bande grise indique l'intervalle de confiance à 95%, pour les simulations avec soja. Chaque point correspond à une simulation globale de 20 ans (la moyenne des 10 dernières années est représentée), avec une résolution de $2.81^\circ \times 2.81^\circ$, et avec des températures de surface de mer climatologiques.

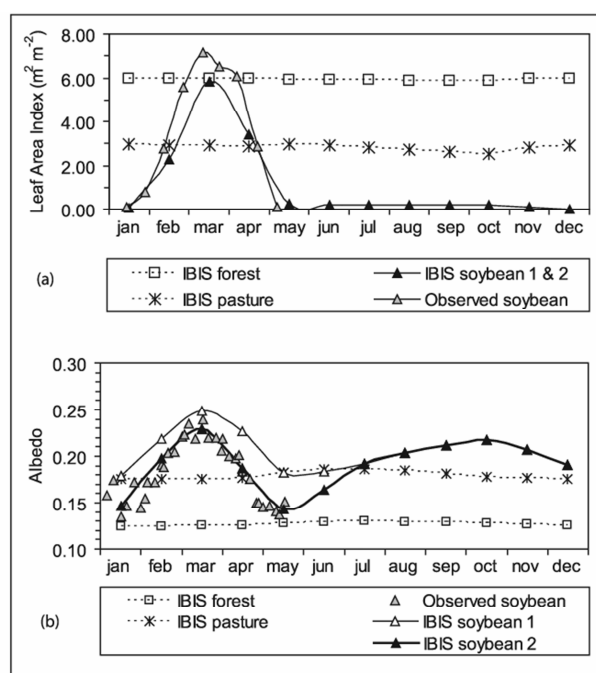


Fig.3.13 : cycle saisonnier de LAI (haut) et albédo (bas) pour la forêt tropicale, les pâturages (pasture), et le soja (soybean), dans le modèle IBIS, sur l'Amazonie, dans l'expérience de Costa et al. (2007). Les termes 1 et 2 se réfèrent à des valeurs d'albédo légèrement différentes choisies pour chaque type de végétation.

2. “Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions”, submitted to *Agricultural and Forest Meteorology*

Cette section est constituée d'un article soumis à *Agricultural and Forest Meteorology*, portant sur l'évolution des rendements agricoles projetée par ORCHIDEE-mil dans le contexte du changement climatique, i.e. forcé par les scénarios climatiques du GIEC. En nous basant sur les résultats du chapitre II, nous avons considéré un domaine régional incluant l'Afrique et l'Inde, sur lequel on a vu que le modèle simulait correctement la variabilité observée des rendements à grande échelle. En outre, il s'agit précisément de deux régions où l'impact du changement climatique sur la productivité agricole peut s'avérer une variable déterminante dans la sécurité alimentaire des populations (cf introduction).

Dans cette étude on a voulu prendre en compte certains aspects majeurs responsables des incertitudes entre les différentes études d'impacts dans la littérature : en particulier, différences de modèles de climat, de scénarios, prise en compte ou non de l'effet du CO₂ sur la végétation.

Le modèle est donc utilisé en « off-line » (i.e., en mode forcé), forcé par les simulations climatiques de différents modèles utilisés pour le 4^{ème} rapport du GIEC, pour deux scénarios (A1B et A2), en prenant en compte ou non l'effet du CO₂ sur la végétation. Du fait des biais régionaux dans les modèles de climat (par exemple sur l'Afrique de l'Ouest, Cook et Vizzy 2006), utiliser les simulations de modèles telles quelles peut être problématique pour fournir des projections d'impact sur certaines régions : ainsi un modèle comme LMDZ, où la mousson ouest-africaine ne « remonte » pas assez au Nord, pourra difficilement fournir une information sur les impacts agronomiques au Sahel si l'on utilise telles quelles les sorties de modèle sur cette région (puisque le modèle agronomique, en conditions « désertiques », ne simulera rien). L'approche souvent utilisée dans les études d'impact, face à cette problématique, est d'utiliser un forçage climatique réaliste (par exemple un jeu de réanalyses) auquel on rajoute l'anomalie climatique simulée par le modèle de climat dans le futur (i.e., la différence moyenne entre le climat simulé futur et le climat simulé présent), pour différentes variables (le plus souvent pour les précipitations et la température). Cette méthode, dite « des anomalies », permet de s'affranchir des biais moyens du modèle de climat pour réaliser les simulations « offline » ; cependant elle souffre également de certaines limites. La première est qu'on en vient en effet à ajouter au forçage réaliste des anomalies qui ne correspondent pas nécessairement, dans la simulation du modèle de climat, au même domaine climatique. En reprenant l'exemple précédent, on prescrit alors en effet sur la zone sahélienne des anomalies qui correspondent à la zone désertique dans le modèle. Qui plus est, cette approche ne permet pas de réaliser des simulations transitoires et d'étudier l'évolution des impacts au cours du temps. Enfin, elle fait par construction l'hypothèse que la variabilité climatique future sera équivalente à celle du présent (i.e., celle du jeu de données climatiques auquel on rajoute l'anomalie moyenne).

L'approche adoptée dans notre cas a donc été de réaliser les simulations avec ORCHIDEE-mil en transitoire, c'est-à-dire sur 1961-2100, sans correction de biais : le modèle est directement forcé par les simulations des modèles de climat. L'idée est ensuite d'analyser l'évolution des rendements dans les différentes simulations, non pas par zone géographique, mais par zone bioclimatique. Ces zones bioclimatiques ne sont pas nécessairement localisées aux mêmes endroits dans les différents modèles, mais partagent, par définition, les mêmes caractéristiques climatiques. Cette approche ne permet certes pas de réaliser des projections explicites géographiquement, mais elle préserve a priori davantage de cohérence dans l'utilisation de l'information fournie par les modèles de climat.

Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions

A. Berg^{1,2}, N. de Noblet-Ducoudré², B. Sultan¹, M. Lengaigne¹, M. Guimberteau¹.

1) LOCEAN-IPSL, Paris, France

2) LSCE-IPSL, Gif-sur-Yvette, France

1. Introduction

One of the most direct impacts global climate change may have on human societies is the potential consequences on global crop production. Agriculture is indeed often considered as the most weather-dependant human activity (Hansen 2002): mean climatic conditions are one of the factors, along with soil fertility and human management, determining mean crop productivity levels across the globe, and interannual variability in regional crop yields reflects regional climate variability (Lobell and Field 2007). Therefore, anthropogenic climate change, as projected by the IPCC's Fourth Assessment Report (2007), has the potential to significantly impact global crop productivity. This is an additional strain on the global food system, which is already facing numerous challenges: in coming decades, crop production will need to increase greatly in order to keep up with population growth, economic development (e.g., shifts towards more carnivorous diets) and, possibly, increasing reliance on crop-based biofuels; furthermore it needs to do so with minimum environmental costs (e.g., deforestation). This is particularly true for developing countries in low latitudes, where most of today's nearly one billion undernourished people already live and where most of the population increase and economic development is expected to take place. For instance, Collomb et al. (1999) estimate that by 2050 food production will need to more than quintuple in Africa, more than double in Asia, and nearly double in Latin America. Griffon (2006) argues that one can not expect this increase in production to be achieved by simply expanding croplands: in sub-Saharan Africa for instance, expanding croplands to their maximum potential area while keeping crop yields constant would barely be sufficient to meet the projected increase in demand, while in effect resulting in complete tropical deforestation. Increasing crop yields is thus a necessary strategy, and in this context, assessing the constraints or opportunities offered by climate change and its impact on crop productivity in those regions may be of crucial importance.

There have been numerous studies on the impact of climate change on crop yields in tropical regions, mostly using climate models projections to drive process-based or statistical crop models. Climate change is generally expected to have detrimental impacts on low latitude crop yields, even under a moderate 1-2°C local warming (IPCC WG II Summary for Policymakers, 2007). Over Africa in particular, crop yield changes are expected to be generally negative: in a recent review by Roudier et al. (*in rev.*), for instance, the meta-analysis of 16 studies over West Africa shows that, over all climate scenarios and models, countries, crops, etc., projected impacts are most frequently slightly negative (-10%); however, there are very large uncertainties between studies (from -50% to +90%). This stems from the fact that most of such agronomical impact studies remain essentially local, focusing on different locations and relying on different climate projections (models, scenarios), crop models, downscaling techniques, time horizons, etc.: a key issue is thus to aggregate and upscale those projections in order to provide consistent and spatially-explicit impact assessments on the regional and continental scale.

There is thus a need to provide large-scale and spatially-explicit assessments of climate change impacts on crop yields which quantify, to some extent, the uncertainty on crop projections. Some studies use extensive simulations with plot-scale process-based crop models to derive such projections (Jones and Thornton 2003, Liu et al. 2007), however, such extensive analysis are costly and therefore usually rely on a single climate projection, not spanning the uncertainty in climate projections. Rather, some authors advocate the use of statistical modeling, based on observed relationships between climate and yields at the regional scale (Lobell et al. 2008, Schlenker and Lobell 2010). More recently, the development of agro-DGVMs (Arneth et al. 2010), i.e. global vegetation model including a representation of croplands, has allowed large-scale process-based crop yield projections: Müller et al. (2010), for instance, use the LPJ-mL model (Bondeau et al. 2007), driven by projections from five climate models, to assess the effect of climate change on major crops globally by 2050. They underline the pivotal role of CO₂ fertilization over tropical regions in their study: they report climate-driven yield decreases on the order of -10% in those regions, but “*fully accounting*” for CO₂ fertilization completely reverses these projections (+10%).

In this context, we use a newly developed agro-DGVM, ORCHIDEE-mil (Berg et al. 2010), which simulates tropical C4 cereals such as millet and sorghum, to project the large-scale impacts of climate change on yields in a tropical domain covering Africa and India, continuously from present to the end of the 21st century. To account for uncertainties in climate projections, the model is driven by climate projections for the A1B and A2 scenarios from, respectively, 7 and 5 climate models. Given the results presented above, we specifically analyze the effect of CO₂ on yield projections. A specific aspect of our study is that we do not analyze yield projections on a geographical basis: rather, we analyze projected changes by bioclimatic zones. This allows us to directly use climate models outputs as forcing data to our vegetation model, despite regional biases in climate models. The methodology and the details of these simulations are presented in the first section. Section 2 presents the results; we discuss those projections in section 3.

2. Models, Data & Methods

2.1. Model: ORCHIDEE-mil

ORCHIDEE-mil is an agro-DGVM developed at IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) for tropical regions, i.e. a global dynamic vegetation model including a representation of tropical croplands (Berg et al. 2010a). It is built on ORCHIDEE (Krinner et al. 2005), the IPSL global vegetation model, and SARRAH, a crop model routinely used by agronomists over West Africa to simulate tropical cereals like millet and sorghum (Dingkuhn et al. 2003; Sultan et al. 2005).

ORCHIDEE simulates water, carbon and energy exchanges between the land surface and the atmosphere. It explicitly computes vegetation growth and can thus be forced by climate data to assess the impact of climate on ecosystems (e.g., Ciais et al. 2005). To represent global vegetation, ORCHIDEE uses 10 natural Plant Functional Types (PFT), and two agricultural PFTs (C3 and C4). While the standard version of ORCHIDEE approximates croplands by grasslands, ORCHIDEE-mil includes, for the C4 cropland PFT, parameterizations and processes taken from SARRAH. ORCHIDEE-mil has been applied over West Africa and India, showing skill in simulating the large-scale interannual response of crop productivity to climate variability (Berg et al. 2010a, b, and non published data).

Crop phenology in ORCHIDEE-mil is driven by water availability: depending on soil water content variations, a rainy season is defined, during which sowing is allowed and is based on a threshold rainfall value. Photosynthesis follows the scheme developed by Collatz et al.

(1992) for C4 plants. Crop growth and development follows the scheme presented in Berg et al. (2010a). The length of the different developmental stages and total cycle duration are computed in thermal time. Although further model development will enable having different cultivar with different cycle duration over different locations, in the simulations presented in this study only one cultivar is used, with a thermal time requirement of 1560 degree.day (around 90 days). In climatic zones where water availability is not limiting (i.e., where precipitation occur all around the year, e.g., equatorial areas), several cycles may take place during the year. In such cases we show as result, except when otherwise stated, the mean yield over the different cycles.

It is important to note that ORCHIDEE-mil only simulates the potential climatic yield from a modern cultivar: it does not account for other non-climatic yield-reducing factors, such as soil fertility limitation, pests or diseases. Therefore, simulated yields are in most cases overestimated when compared to observed on-farm data (Berg et al. 2010a); however, this mean bias is constant over time, and the model correctly simulates the large-scale yield variability in response to climate. The implications of this bias for the present study will be discussed in the last section.

2.2. Climate data

Monthly outputs from transient simulations over the 20th (20C3M, 1961-2000) and 21st (2001-2100) centuries were retrieved from the PCMDI archive (Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison) for several climate models and scenarios from CMIP3 (the World Climate Research Programme's (WCRP's) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 multi-model dataset). We aimed at using as many climate models as possible, in order to span the uncertainty in climate projections; however, the availability of the various climate variables limited, in effect, the number of climate models that could be used: 7 models for the whole 1961-2100 period with the A1B scenario, and 5 for the same period with the A2 scenario (these 5 models being a subset of the 7 first ones – see tab.1). When forced by monthly data, ORCHIDEE uses a weather generator to temporally disaggregate the data. The monthly variables used are: precipitation, number of rainy days, 2-meter temperature, 2-meter minimum and maximum temperatures, surface specific humidity, 10-meter wind, cloud cover. The number of rainy days per month was not available at a monthly time scale in the PCMDI archive: it thus had to be recomputed for the different climate models. To do so, the number of rainy days per month was computed for the different climate models for time periods over which the models outputs were available at a daily time step (i.e., 1961-2000, 2046-2065, 2081-2100). Then, for each pixel, for each month, the number of rainy day was linearly interpolated between the mean values of the different time periods.

To allow comparing the results of the different simulations more easily, all climate model outputs are regridded to a 2.5°x2.5° resolution.

2.3. Methods

2.3.1. Simulations

ORCHIDEE-mil is forced by the datasets described above over a tropical domain including Africa and India (-30°/35°N; -20°/90°E), two regions which are the largest producers of millet and where the model has been used before (Berg et al. 2010a, b; non published data):

- Transient runs are performed over 1961-2100, with a 30 years spin-up performed on the first year of simulation (1961) to initialize soil water content. Historical runs (over 1961-2000) are performed with historical CO₂ values. Runs for the 21st century are performed either with the changing CO₂ concentrations from the corresponding scenario over 2000-2100, or with CO₂ levels kept constant at their 2000 value.

Finally, because croplands area projections are intrinsically uncertain and because we are interested in the change in potential crop productivity over the whole study domain, no cropland distribution map is prescribed in our simulations: croplands are simulated everywhere over the study domain.

2.3.2. Output analysis

Climate models have important regional biases, for different climate variables. This is particularly true for precipitation patterns in the Tropics: Cook and Vizy (2006), for instance, show that coupled climate models poorly represent the mean climatology of the West African monsoon. It is thus difficult to analyze the projected impacts of climate change on crops on a geographical basis (e.g., yield change in a given country): because of these biases, aggregating simulation outputs by geographical units (countries, or sub-regions) might lead to spurious results. For instance, if in a given climate model the simulated West African monsoon is too weak and rainfall does not propagate inland enough, aggregating ORCHIDEE-mil's subsequent outputs over sahelian countries (Niger, Mali, Senegal, etc.) will in effect result in considering pixels that do not correspond, in the model, to the simulated Sahel, but to a simulated desert area. This will lead to irrelevant results, in particular if one analyzes the future evolution of average yields in these countries and compare such results across different models with different biases. Therefore, raw climate model outputs are usually not used to drive large-scale impact assessment models: most studies rely on the "anomaly method" – that is, simulated climate changes are added to a baseline observed climatology. This method is almost systematically used for large-scale assessment of future climate change impacts on agro-ecosystems driven by climate model projections, whether with statistical models (Schlenker and Lobell 2010) or with process-based models (Sitch et al. 2001, Jones and Thornton 2003, Scholze et al. 2006, Müller et al. 2010). The rationale for this method is that it removes the mean biases from the climate model outputs: therefore outputs from the vegetation model can be analyzed on a geographical basis. It is arguably the only direct method to get around large-scale climate model biases for impact assessments. However, it is not completely satisfactory: the climate change anomalies that are added to the observed climatology may not be geographically consistent with the baseline climatology. For instance – following the same example as above - precipitation change over the "geographical" Sahel, in a given climate model, might in fact correspond, in the model simulated climate, to precipitation change over the Sahara – if the West African monsoon is too weak – or over the sudanian domain – if the monsoon is too strong.

In this context, to analyze our simulations we follow a bioclimatic approach instead: simulation outputs are aggregated not by geographical units, but by bioclimatic regions. This allows us to use climate model outputs directly to drive ORCHIDEE-mil, despite regional climate biases, while not relying on the "anomaly" method. Because of the differences in the mean simulated climate in various GCMs, the corresponding geographical regions are not the same across the different models; however, they share the same broad climatic conditions. Because they result from the same general physical processes in the climate models, their projected evolution can be compared across different GCMs. Such a method thus provides a physically consistent assessment of crop yield potential changes over current bioclimatic zones.

In our study the bioclimatic regions are defined according to the Köppen bioclimatic classification (Kottek et al. 2006). The definitions are based on threshold values and seasonality of monthly temperature and precipitation, taking into account the interactions between both variables (see Kottek et al. 2006 for more details). We acknowledge that other climate classification could be considered, such as the Thornthwaite classification (Feddema

et al. 2005). The rationale for adopting the Köppen classification in this study is that it is meant to empirically reflect biome distributions, thus corresponding to different climatic constraints and different plant behaviors. Given the large number of climate types (31) in the complete Köppen classification, we only consider here the 7 most generic types: when restrained to the simulation domain, these types correspond to equatorial fully humid zones, equatorial zones with a dry season, dry zones, temperate zones, and desert (fig.1). The simplified Köppen types are defined for each model over 1961-2000. One may note the differences across GCMs, and the errors when compared with observations, even with a simplified classification (fig.1): this illustrates the regional biases in the simulated climate of these models. For instance, India is simulated as mostly an 'arid' or 'desert' zone in the IPSLM4 model, whereas it is mostly an 'equatorial with dry season' zone in observations (fig.1). Gnanadesikan and Stouffer (2006) have used a similar simplified Köppen classification to evaluate coupled climate models.

To analyze the transient simulations and evaluate future yield changes, we simply average simulated yields every year over each climatic zone in each model, keeping the present-day location of this climatic zone constant in this model: in other words, for each climatic zone, yields are averaged over the same pixels every year - bioclimatic zones are not redefined over time. Because we perform transient simulations, we are able to impacts on any time horizon. Here we mainly focus on long-term yield changes (i.e. for 2070-2100); we also present results for the shorter term (for 2020- 2050)

3.Results

3.1 Climate change

Figure 2 shows the projected climate change for the different climate models and climatic zones, by 2100. Climate models consistently project increased temperatures over the study domain, between +2.1 K and 4.7 K across models, zones, and scenarios (fig.2). There is more variability between climate models than between Köppen zones: the increase in temperature within one model is spatially homogenous, so that in one model all Köppen zone experience a similar warming. The different temperature increases across climate models reflect the different climate sensitivities of the GCMs (IPSLCM4 for instance, which shows the largest increase in temperature, has a strong 4.4 K climate sensitivity).

By contrast, the projected relative changes in precipitation remain small (most of the time below 10%) and largely inconsistent across models (in sign and amplitude) for all Köppen zones. Moreover, they are not always significant when compared to interannual variability. This is consistent with the well-know result that rainfall projections on tropical land are mostly inconsistent across climate models (Douville et al. 2005). Over the study domain, this is particularly true for West Africa (Cook and Vizio 2006, Christensen et al. 2007). There are no obvious relationships between warming and precipitations changes over the different zones.

Warming is only slightly more pronounced under the A2 scenario (fig.2) than under the A1B scenario, by roughly 1 K; changes in rainfall, on the other hand, are insensitive to the emissions scenario (fig.2).

3.2 Change in simulated yields

Fig.3 shows, for each climate model and Köppen zone, the projected long-term yield changes by the end of this century (2070-2099), as well as the shorter term yield change (2020-2049),

compared to a 1970-1999 baseline, for each scenario. In those simulations, atmospheric CO₂ increases (according to the corresponding scenario).

Under both scenarios and on both time horizons, projected yield changes follow the same general pattern. Yields changes are consistently negative in both equatorial zones (fully humid and with a dry season), and to a lesser extent, in the temperate zone. The largest long-term yield decreases remain around -20%. On average, the projected long-term decrease is strongest in the “equatorial fully humid” zone (-16.3 % under the A1B scenario, -18.7 % under the A2 scenario). Yield changes in “dry” zones, on the other hand, are larger, but also more inconsistent across climate models. For instance, long-term impacts range from -44 % to +56% under the A1B scenario.

Climate change impacts on yields remain smaller on the short term than on the long term, but impacts are already significant by 2020-2049. For instance average yield decrease on the “equatorial fully humid” zone is -6.75 % under the A1B scenario (-6.08% under the A2 scenario). However, yield changes by 2020-2049 are not always significant, in particular over arid areas (fig.3.c).

Finally, our results show no consistent change in yield interannual variability (measured by standard deviation) between 1970-1999 and 2070-2099 (fig.3bis). Most changes remain non-significant, except for the BCCR models which projects a consistent increase in yield variability over all Köppen zones (under both scenarios).

3.3 Climatic drivers of simulated yield changes

Plotting the average yield changes as a function of mean climate change for each Köppen zone highlights the main first-order climatic drivers behind those changes (fig.4). We focus on long-term changes in order to maximize the climate change signal. In equatorial zones and in the temperate zone, the decrease in yields appears relatively proportional to the increase in temperature. In “dry” zones, on the other hand, yield changes are mostly driven by the change in rainfall.

Because cycle duration in the model is computed in thermal time (i.e., as sum of daily temperature to be reached), the effect of increased daily temperature is to speed up phenology and reduce the length of the crop cycle. Therefore, less biomass can be assimilated and total biomass is reduced, which directly leads to a reduction in yield. This effect explains the decrease in yield as a function of temperature increase seen on fig.4: the yield decrease is directly an effect of reduced biomass; the simulated harvest index (ratio of grain mass to total biomass) does not decrease in the simulations (not shown). This effect, however, only occurs over a given range of temperatures: in the model, above a certain temperature threshold, temperature increase has no further effect on phenology and does not accelerate the crop cycle. The effect is thus limited in areas where temperatures are already high, e.g., “dry areas”. In those areas, vegetation growth is mostly constrained by water availability, so that the effect of precipitation change dominates. It has to be noted that, although larger in relative values, the projected yield changes in those areas remain more modest in absolute terms, because absolute simulated yields are lower: for instance the decrease in fig.3d in the IPSLCM4 simulation corresponds to an absolute decrease of -89 kg/ha. Moreover, in the arid areas as defined by the Köppen classification, crops do not grow everywhere: some pixels are too dry for vegetation to grow in the model. On average across all models (over 1961-2000), 56% of the “arid” zone has no vegetation. Consequently, because we average the simulation outputs over the whole “arid” Köppen zone, yield changes reported on fig.3 reflect the combination of two effects: the increase (decrease) in yield over “arid” pixels where crops can grow in the model, and the extension (reduction) of the area of the “arid” zone where crops can grow (fig.5).

3.4 Effect of CO₂

Fig.6 compares projected long-term yield changes in simulations with increasing CO₂ (the ones presented in the previous section) and in simulations where CO₂ is kept constant throughout the 21st century at its 2000 value. The comparison is done for the A2 scenario, in which the increase in CO₂ is greater, in order to maximize the possible impact of CO₂. Fig.6 shows that, even under the A2 scenario, the increase in CO₂ has little effect on the projected yield changes. Across all models, yield increases from CO₂ increase are: 1.6 %, 1.5 %, 6.8%, 2.1% for the “equatorial fully humid”, “equatorial with dry season”, “dry”, and “temperate” zones.

The impact of CO₂ thus remains small; the largest effect takes place in “dry” areas. This limited effect is consistent with the expected impact of increased atmospheric CO₂ levels on C4 plants: increased atmospheric CO₂ levels provide little direct stimulation of C4 photosynthesis (i.e., the fertilization effect), but drought stress can be ameliorated at elevated [CO₂] as a result of lower stomatal conductance and greater intercellular [CO₂] (Long et al. 2006, Leaky 2009). The consistency of this simulated effect with other modelling studies will be discussed in section 4.

3.5 Annual productivity changes

In section 3.2 we analyzed the impact of climate change on yield by considering the mean annual yield - that is, if several crop cycles occur during the year (i.e., in areas where precipitation is no limiting factor, such as equatorial fully humid areas), we considered the mean yield over the different cycles. However, in those regions, when several (e.g., 2) crop cycles take place during the year, it is also possible to consider the sum of the yields from the different cycles – that is, the annual productivity (as opposed to the productivity per cycle). Fig.7 shows that in this case, yield decrease are actually nearly nil, on average, over these regions. Because on average crop cycles become shorter with higher temperatures, if water availability is not a limiting factor, the number of crop cycles tends to increase, on average, over the area (fig.7b). As a result, the total annual yield does not change: smaller yields per cycle are offset by an increase in the number of cycles.

4. Discussion

4.1 Projected climate change and yield changes

The main effect of climate change on crop yields in our simulations consists in higher temperature leading to an acceleration of the phenological cycle, thus reducing yields. This effect generally leads, depending on the degree of warming in a given climate projection, to yield decreases on the order of -10/-20% by the end of the century, taking place over most of the study domain: equatorial zones and temperate zones account for 68% of the study domain here (excluding sea and desert). Where water availability is the dominant constrain on crop growth, large projected yield changes follow precipitation projections.

It is interesting to note that the scale of impacts is not proportionate to the time horizon considered: although the 2020-2049 time period is intermediate between 1970-1999 and 2070-2099, long-term impacts are generally more than twice those of the on shorter term (fig.3). This stems from the nonlinear evolution of yield climatic drivers in the context of climate change - in particular, the increase of temperature is not linear. In addition, in some particular cases short-term and long-term projections may not be consistent: for instance, the

INMCM model projects, under the A2 scenario, a decrease in precipitation over arid zones by 2020-2049 (no shown), but a significant increase by 2070-2099 (fig.2b): as a result, projected yield changes are negative on the short term, but positive on the long term (fig.3b and 3d). These results underline that although short-term impact assessment undoubtedly provide useful information for agricultural planning and adaptation, they only provide a partial picture of the full-scale impacts of climate change on agriculture.

Because warming by the end of the century is greater in the A2 scenario, impacts over both equatorial zones and the temperate zone are on average greater in the A2 scenario than in the A1B scenario. Conversely, impacts are less detrimental over arid areas under the A2 scenario: this somewhat counter-intuitive result stems from the CO₂ effect on water use efficiency being greater in the A2 scenario, whereas there are little differences in precipitation changes between both scenarios.

The consistency of yield change projections across models reflects the consistency of climate projections: temperature increase being consistently projected by all models, projected yield changes in regions where the effect of temperature change dominates are broadly consistent across models; changes in precipitation, on the other hand, remain largely inconsistent, so that large projected yield changes in regions where the effect of precipitation change dominates diverge across models. As a result, despite the consistent temperature-driven yield decrease over much of the study domain and the smaller proportion of the 'arid' Köppen zone (32%), the projected long-term yield change over the whole simulation domain under the different climate model projections ranges from -27% to +11%, with a mean inter-model value of -5%, under the A2 scenario (-29% to +11% under the A1B scenario). This range mostly reflects the divergence of projected yield change over arid zones.

These results underline, fundamentally, the need to narrow the uncertainty in precipitation projections from climate models over dry areas in order to be able to provide reliable agricultural impact assessments in the Tropics. Here, some models generally predict an important increase of precipitation (e.g., Miroc-medres), while others predict important drying (e.g., Csiro3.5). The choice of climate models in this study was based on practical considerations: other models may arguably provide more realistic projections. However, it has to be noted that trying to define a few 'best' models based on evaluation of the models' behavior over current climate does not ensure robust climate projections (e.g., Cook and Vizzy 2006). Using a suite of climate models to quantify the uncertainty thus remains the only possible strategy. It also has to be noted that the expansion of croplands, which in these regions will likely be a component of any strategy towards future food security, has the potential, through modification of land/atmosphere interactions, to substantially alter regional climate (e.g., Davin et al. 2007). This land-use induced climate change is not accounted for in the climate projections used in this study, thus adding to the overall uncertainty in climate projections and subsequent yield changes.

4.2 Comparison with previous studies

Because we analyze crop yields change from our simulations on a bioclimatic basis, it is difficult to precisely compare our results to other large-scale impact assessments whose results are reported on a geographical basis (Jones and Thornton 2003, Liu et al. 2007, Schlenker and Lobell 2010, Müller et al. 2010). However, accounting for the uncertainty in precipitation, the order of magnitude of our results is broadly consistent with previous findings from Jones and Thornton (2003) and Schlenker and Lobell (2010). Based on extensive simulations with the CERES-maize crop model driven by climate projections from the HadCM2 climate model, Jones and Thornton (2003) project an overall decrease of maize yield of -10% over Latin America and Africa by 2050, with impacts varying between -30 and +2% over Sub-saharan African countries (-14% on average). Although they do not specify

which climate effects drive these changes, the spatial homogeneity of their results suggest that they mainly result from the temperature increase. Schlenker and Lobell (2010), on the other hand, use empirical large-scale relationships between climate and yields, extrapolated with projections from 16 climate models, to project crop yield changes in Sub-saharan Africa by 2050. They report a projected yield decrease on the order of -20% for C4 cereals, which in their study is entirely driven by the increase in temperature (although the statistical nature of their analysis does not allow them to specify the physiological pathway by which this effect occurs). Both studies are thus consistent with our result that the main impact of climate change is a temperature-driven yield decrease of -10/20%. In their study with the EPIC crop model over Sub-saharan Africa, however, Liu et al. (2007) project yield increase for millet between +7 and +27% by 2030, which they attribute to higher average temperatures being closer to the optimal temperature for millet; although the EPIC model also calculates cycle duration in thermal time, they do not report any effect of temperature on phenology. The simulated positive impact in their study may, however, be related to the way they account for the effect of CO₂ (see below).

A major source of uncertainty in crop yield projections is the impact of higher atmospheric CO₂ levels on crop physiology (Soussana et al. 2010, Roudier et al., *in rev.*). On this aspect, our results are not consistent with those of Müller et al. (2010) or Liu et al. (2007). Using the agro-DGVM LPJ-mL (Bondeau et al. 2007)), Müller et al. (2010) show that over the Tropics as a whole, the sign of the projected yield change depends on the effect of CO₂ fertilization. For instance they project yield decreases of -7% and -16% over Sub-saharan Africa and South Asia (e.g., India) when CO₂ is not accounted for; taking the CO₂ effect into account in their simulations completely reverses these projections (+7.5% and +19.8%, respectively). Liu et al. (2007) report similar findings, with the sign of projected maize yield change by 2030 being dependant on the inclusion of the CO₂ fertilization effect; millet sharing the same photosynthetic pathway (C4) as maize, the reported increase in millet yield in their study is likely partly due to the CO₂ effect as well. By contrast, we showed in section 3.3 that the effect of CO₂ in our study was very limited.

The magnitude of higher atmospheric CO₂ levels on plant growth remains a matter of active debate and research (Long et al. 2006, Tubiello 2007, Zika and Bunce 2007, Ainsworth et al. 2008). However, the general consensus is that while CO₂ effect might be important for C3 plants, increased atmospheric CO₂ levels can be expected to have no direct fertilization effect on C4 plants, and only moderately improve plant resistance to water stress through increased water use efficiency (Long et al. 2006, Leakey 2009). The simulated effect of CO₂ in our study is consistent with this consensus. By contrast, the strong impact of higher levels of atmospheric CO₂ (by 2030 only) on C4 crops in Liu et al. (2007), in which this effect is essentially parameterized as a coefficient on radiation use efficiency, seems questionable. Finally, in the study by Müller et al. (2010), LPJ-mL also simulates C3 crops (rice, wheat, soybean, and others): this may explain the effect of CO₂ in their study, and the difference with our results; however, the magnitude of this effect, in their case, seems particularly strong. In addition the main crops grown in Sub-saharan Africa are C4 crops (sorghum, millet, maize): although the prescribed proportions of the different crops is not described in Müller et al. (2010), the expected contribution of higher C3 yields to the overall projected yield change over this region should be small. In this context, the strong impact of CO₂ fertilization on tropical crop yields change shown in Müller et al. (2010) remains questionable.

4.3 Mitigating climate change impacts on crop yields

We stress that the results presented in this study should not be viewed as realistic predictions of the actual yield changes that will occur by 2100. ORCHIDEE-mil, as the crop model SARRAH from which it is derived, only simulates the yield of a modern cultivar, as grown on

an experimental station: sowed at high density and optimally managed (in terms of fertilization, but also diseases and pests). Therefore, simulated yields correspond to the climatic attainable yield. Our results thus underline the scope of potential climate-related impacts of climate change on crop yields, everything else staying equal. In addition, we aggregated simulation outputs over the whole study domain, not using a realistic cropland distribution, and even allowing this distribution to change over time (see sec.3.3): our results are thus relevant to the potential crop productivity over the study domain. It remains unclear how the projected potential impact of climate change will translate into changes in actual, on-farm crop productivity. Because of poor soil fertility and low input levels, combined with extensive agricultural practices (e.g., low sowing densities – Bationo et al., 1992), actual yields in Africa and, to a lesser extent, in India, fall short of the potential yields by a large measure. Numerous studies have shown that the main limitation to current crop yields in those regions is the lack of organic and mineral fertilization: for instance, Bationo et al. (1993, 2006) show that in West Africa, on-farm yields of millet or sorghum can be multiplied up to tenfold (typically from 200 kg/ha to 2t/ha) and sustained at this level through the use of organic amendments (e.g., restitution of crop residue) and mineral fertilizers (in particular phosphate) combined with higher sowing densities. In India, Murty et al. (2007) report differences of a factor 2 to 4 between on-farm millet and sorghum yields and potential yields obtained on experimental station plots. Therefore, even considering the potential adverse climate change impacts presented in this study, there is a very large and untapped potential of yield increase through the use of improved agricultural practices: it is obvious that filling the current “yield gap” in those regions would more than offset the negative impact of climate change. In addition, adaptation of agricultural practices can at least partly mitigate the impact of climate change on crops. For example, in arid regions, development of irrigation, soil water conservation and water harvesting techniques (Howden et al. 2007) can help mitigate adverse changes in water availability. Similarly, changes in cultivars or in cropping systems can mitigate the impact of higher temperatures on phenology. Some results of our simulations show such an adaptation: in section 3.4, we showed that in regions where water availability is not a limiting factor, annual productivity was not impacted by climate change, because smaller yields per cycle were offset by an increase in the average number of crop cycles. We do not claim that these results represent a realistic future response of farmers to climate change: rather, they merely suggest that in some cases it is possible to adapt cropping systems in order to mitigate the impact of climate change.

Therefore, in developing countries of tropical regions, implementing more intensive agricultural practices and adapting agriculture to climate and environment change has the potential to more than offset the projected impacts of climate change. It is outside the scope of this paper to discuss if such improvements will allow meeting the increase in demand projected by Collomb et al. (1999) as mentioned in the introduction. However, one can note that such structural changes require investments, institution and human capital building that will not occur without active development and agricultural policies: for example, increasing investment in irrigation infrastructure; ensuring availability and affordability of agricultural inputs (seeds, fertilizers); ensuring appropriate transport, storage and markets for both inputs and products; etc. (Howden et al. 2007). In Africa in particular, the last decades have overall seen little progress on those fronts: per capita cereals production declined by 13% between 1965 and 2000 (FAO, 2001), with the increase in population outpacing the increase in food production; most of the increase in production, moreover, has been achieved through the expansion of croplands, not through increased yields, a strategy which is not sustainable over the long term (Bationo et al. 2007). Given that the necessary changes in the agricultural system did not take place in the past decades, they certainly can not be taken for granted in

the future; in which case, the impact of climate change will be a significant additional strain on the food system and further challenge future food security.

Besides uncertainties on the drivers of future yield change (climate change, CO₂ effect, land management), uncertainty in our results also stems from the necessary imperfect large-scale modeling of crop yields: in such a framework many processes are simply implemented, or sometimes missing. For instance, the effect of certain climatic extremes are not taken into account, such as the impact of intense heat during particular development stages on grain quantity and quality (Wheeler et al. 2000); or the impacts of floods from heavy rainfall events. Moreover, in climate-driven crop models such as ORCHIDEE-mil, potential impacts from the interactions of climate and atmospheric CO₂ changes with biotic factors (pest, diseases or weeds), are also not accounted for (Soussana et al. 2010). It is not clear whether all the relevant effects and their interactions can be implemented in a single, exhaustive crop model: it can be argued that the best approach to provide a complete assessment of the impact of climate change on crops is through the use of a “hierarchy of models” of different scale and complexity (Soussana et al. 2010). In this context, ORCHIDEE-mil, and agro-DGVMs in general, allow straightforwardly providing mechanistic large-scale and spatially-explicit assessments. The bioclimatic approach used in this study further allows using climate models outputs directly as forcing to the vegetation model, despite regional biases in climate models. By analyzing outputs according to the main climatic limitations, it highlights the main climatic drivers of the impact of climate change on crops.

Conclusion

Using a newly developed agro-DGVM driven by projections from several climate models and scenarios over Africa and India, we find the potential productivity of the most important staple crop in those regions, millet, will overall decrease, on average over all models and scenarios, by -6% (individual model results ranging from -29% to +11%). By analyzing yields on a bioclimatic basis through the Köppen classification, we find moderate and consistent temperature-driven yield decreases over areas which are not water-limited, and larger yield changes in water-limited regions over which the uncertainty in yield change reflects the uncertainty in precipitation projections from climate models. The uncertainty in aggregated impacts reflects the uncertainty over water-limited areas, underlining the need to narrow the uncertainty in precipitation projections over dry areas, if reliable agricultural impact assessments over tropical regions are to be provided. Our results also highlight the limited magnitude of the impact of CO₂ on crop yields for C4 crops. While such climatic impacts further increase the challenge of achieving future food security in developing countries in the Tropics, most these impacts can arguably be mitigated through adaptation measures and improved agricultural practices.

Acknowledgements

We acknowledge the modeling groups, the Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) and the WCRP's Working Group on Coupled Modelling (WGCM) for their roles in making available the WCRP CMIP3 multi-model dataset. Support of this dataset is provided by the Office of Science, U.S. Department of Energy.

Alexis Berg is supported by the Region Ile-de-France PhD funding program.

References

- Ainsworth, E.; Leakey, A.; Ort, D. & Long, S. (2008), 'FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply', *New Phytologist* **179**(1), 5--9.
- Bationo, A.; Christianson, C.; Baethgen, W. & Mokuwunye, A. (1992), 'A farm-level evaluation of nitrogen and phosphorus fertilizer use and planting density for pearl millet production in Niger', *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **31**(2), 175--184.
- Bationo, A.; Christianson, C. & Klaij, M. (1993), 'The effect of crop residue and fertilizer use on pearl millet yields in Niger', *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **34**(3), 251--258.
- Bationo, A.; Kihara, J.; Vanlauwe, B.; Waswa, B. & Kimetu, J. (2007), 'Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems', *Agricultural Systems* **94**(1), 13--25.
- Berg, A.; Sultan, B. & de Noblet-Ducoudré, N. (2010a), 'Including tropical croplands in a terrestrial biosphere model: application to West Africa', *Climatic Change*, 1--28.
- Berg, A.; Sultan, B. & de Noblet-Ducoudré, N. (2010b), 'What are the dominant features of rainfall leading to realistic large-scale crop yield simulations in West Africa?', *Geophysical Research Letters* **37**(5), L05405.
- Bondeau, A.; Smith, P.; Zaehle, S.; Schaphoff, S.; Lucht, W.; Cramer, W.; Gerten, D.; Lotze-Campen, H.; Müller, C.; Reichstein, M. & others (2007), 'Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance', *Global Change Biology* **13**(3), 679--706.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ciais, P.; Reichstein, M.; Viovy, N.; Granier, A.; Ogee, J.; Allard, V.; Aubinet, M.; Buchmann, N.; Bernhofer, C.; Carrara, A. & others (2005), 'Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003', *Nature* **437**(7058), 529--533.
- Collatz, G.; Ribas-Carbo, M. & Berry, J. (1992), 'Coupled photosynthesis- stomatal conductance model for leaves of C4 plants', *Australian Journal of Plant Physiology* **19**(5), 519--538.
- Collomb, P. (1999), *Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050*, published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO-Economica.
- Cook, K. & Vizy, E. (2006), 'Coupled model simulations of the West African monsoon system: Twentieth-and twenty-first-century simulations', *Journal of climate* **19**(15), 3681--3703.

Cramer, W.; Bondeau, A.; Woodward, F.; Prentice, I.; Betts, R.; Brovkin, V.; Cox, P.; Fisher, V.; Foley, J.; Friend, A. & others (2001), 'Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models', *Global Change Biology* **7**(4), 357--373.

Davin, E.; de Noblet-Ducoudré, N. & Friedlingstein, P. (2007), 'Impact of land cover change on surface climate: Relevance of the radiative forcing concept', *Geophysical Research Letters* **34**(13), L13702.

Dingkuhn, M.; Baron, C.; Bonnal, V.; Maraun, F.; Sarr, B.; Sultan, B.; Clopes, A. & Forest, F. (2003), 'Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales', *Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa A Practical Guide*, 127.

Douville, H.; Salas-Mélia, D. & Tyteca, S. (2006), 'On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming', *Climate Dynamics* **26**(4), 367--385.

Feddema, J. (2005), 'A revised thornthwaite-type global climate classification', *Physical Geography* **26**(6), 442--466.

FAO (2001), *Soil Fertility Management in Support of Food Security in Sub-Saharan Africa*, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Rome, Italy.

Gnanadesikan, A. & Stouffer, R. (2006), 'Diagnosing atmosphere-ocean general circulation model errors relevant to the terrestrial biosphere using the Köppen climate classification', *Geophys. Res. Lett.* **33**, L22701.

Griffon, M. (2006), 'Nourrir la planète', *Paris, Eds. Odile Jacob*.

Howden, S.; Soussana, J.; Tubiello, F.; Chhetri, N.; Dunlop, M. & Meinke, H. (2007), 'Adapting agriculture to climate change', *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**(50), 19691.

IPCC (2007), 'Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,' Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Eds., Cambridge Univ Press, Cambridge, UK).

IPCC, WG II Summary for Policymakers (2007). In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.

Jones, P. & Thornton, P. (2003), 'The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055', *Global Environmental Change* **13**(1), 51--59.

Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B. & Rubel, F. (2006), 'World Map of the Köppen-

Geiger climate classification updated', *Meteorologische Zeitschrift* **15**(3), 259--264.

Krinner, G.; Viovy, N.; de Noblet-Ducoudré, N.; Ogée, J.; Polcher, J.; Friedlingstein, P.; Ciais, P.; Sitch, S. & Prentice, I. (2005), 'A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system', *Global Biogeochemical Cycles* **19**(1), 1--33.

Leakey, A. (2009), 'Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel', *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **276**(1666), 2333.

Liu, J.; Fritz, S.; Van Wesenbeeck, C.; Fuchs, M.; You, L.; Obersteiner, M. & Yang, H. (2008), 'A spatially explicit assessment of current and future hotspots of hunger in Sub-Saharan Africa in the context of global change', *Global and Planetary Change* **64**(3-4), 222--235.

Lobell, D.; Burke, M.; Tebaldi, C.; Mastrandrea, M.; Falcon, W. & Naylor, R. (2008), 'Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030', *Science* **319**(5863), 607.

Lobell, D. & Field, C. (2007), 'Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming', *Environmental Research Letters* **2**, 014002.

Long, S.; Ainsworth, E.; Leakey, A.; Nosberger, J. & Ort, D. (2006), 'Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations', *Science* **312**(5782), 1918.

Müller, C.; Bondeau, A.; Popp, A.; Waha, K. & Fader, M. (2010), 'Development and Climate Change, Climate change impacts on agricultural yields'. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Background note for the World Development Report 2010. Contribution to the World Development Report 2010: Development and Climate Change. The World Bank, Washington, DC.

Roudier, P., Sultan, S., Quirion, P., Berg., A, 'The impact of future climate change on West African crop yields: what does the recent literature say?' in revision for Global Environmental Change.

Schlenker, W. & Lobell, D. (2010), 'Robust negative impacts of climate change on African agriculture', *Environmental Research Letters* **5**, 014010.

Scholze, M.; Knorr, W.; Arnell, N. & Prentice, I. (2006), 'A climate-change risk analysis for world ecosystems', *Proceedings of the National Academy of Sciences* **103**(35), 13116.

Soussana, J.; Graux, A. & Tubiello, F. (2010), 'Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures', *Journal of Experimental Botany*.

Sultan, B.; Baron, C.; Dingkuhn, M.; Sarr, B. & Janicot, S. (2005), 'Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon', *Agricultural and forest meteorology* **128**(1-2), 93--110.

Tubiello, F.; Amthor, J.; Boote, K.; Donatelli, M.; Easterling, W.; Fischer, G.; Gifford, R.;

Howden, M.; Reilly, J. & Rosenzweig, C. (2007), 'Crop response to elevated CO₂ and world food supply:: A comment on', *European Journal of Agronomy* **26**(3), 215--223.

Wheeler, T.; Craufurd, P.; Ellis, R.; Porter, J. & Vara Prasad, P. (2000), 'Temperature variability and the yield of annual crops', *Agriculture, Ecosystems & Environment* **82**(1-3), 159--167.

Ziska, L. & Bunce, J. (2007), 'Predicting the impact of changing CO₂ on crop yields: some thoughts on food', *New Phytologist* **175**(4), 607--618.

Climate model	Simulations with the A1B scenario	Simulations with the A2 scenario
BCCR	yes	yes
MIROC MEDRES	yes	yes
MIROC HIRES	yes	no
CSIRO 3.5	yes	yes
GISS AOM	yes	no
IPSLCM4	yes	yes
INMCM	yes	yes

Tab.1: climate models and scenario used to force ORCHIDEE-mil in this study. A full description of those models can be found at http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php

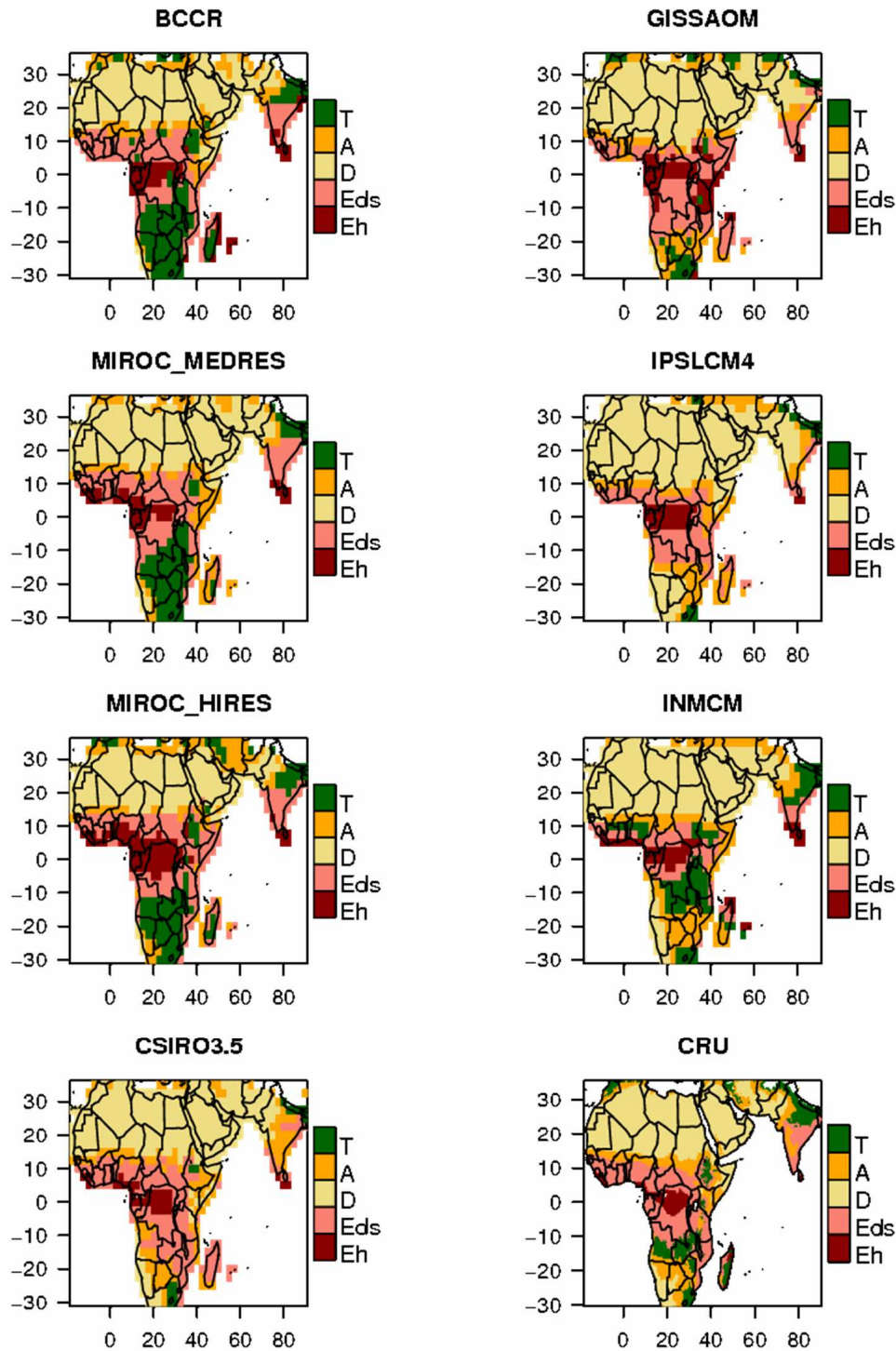


Fig.1: Simplified Köppen classification, over the study domain, for the 7 seven climate models used in this study, defined from the monthly outputs over 1961-2000 from the 20th century runs stored at the PCMDI archive. The bottom right panel is obtained from the CRU monthly data over 1951-2000. T=temperate, A=arid, d=desert, Eds=Equatorial with dry season, Eh=Equatorial fully humid.

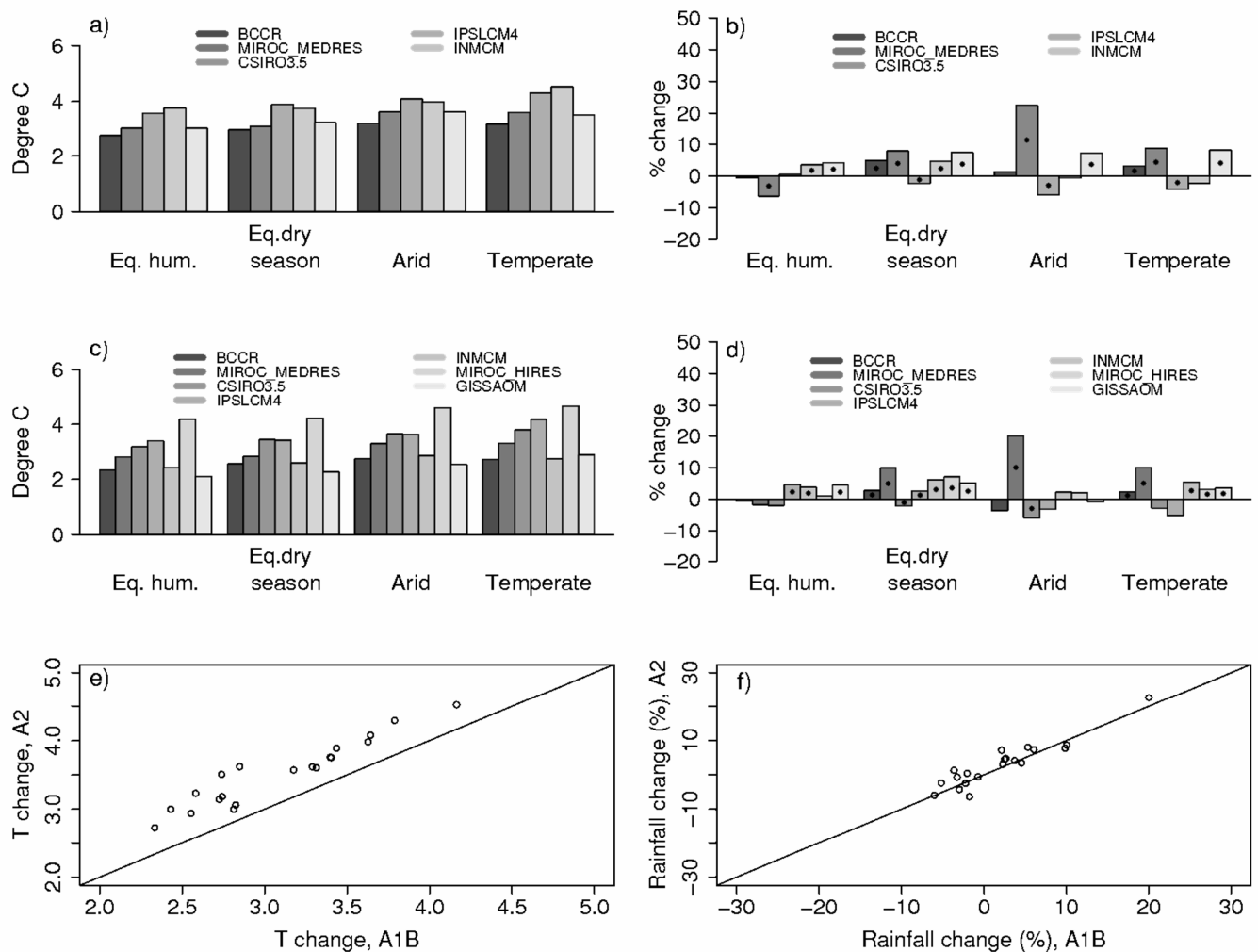


Fig.2: **a**: Average temperature change between 2070-2099 and 1970-1999 over the different Köppen zones and climate models, for the A2 scenario; **b**: Average relative change in annual precipitation between 2070-2099 and 1970-1999 over the different Köppen zones and climate models, for the A2 scenario. Dots indicate changes that are significant at the 5% level; **c** and **d**: same as **a** and **b** but for scenario A1B. **e**: comparison between the data from **a** and **c**, for the 5 climate models for which simulations were performed both for the A1B and A2 scenario (5 models * 4 zones = 20 points) ; **f**: same as **e**, but for precipitation changes.

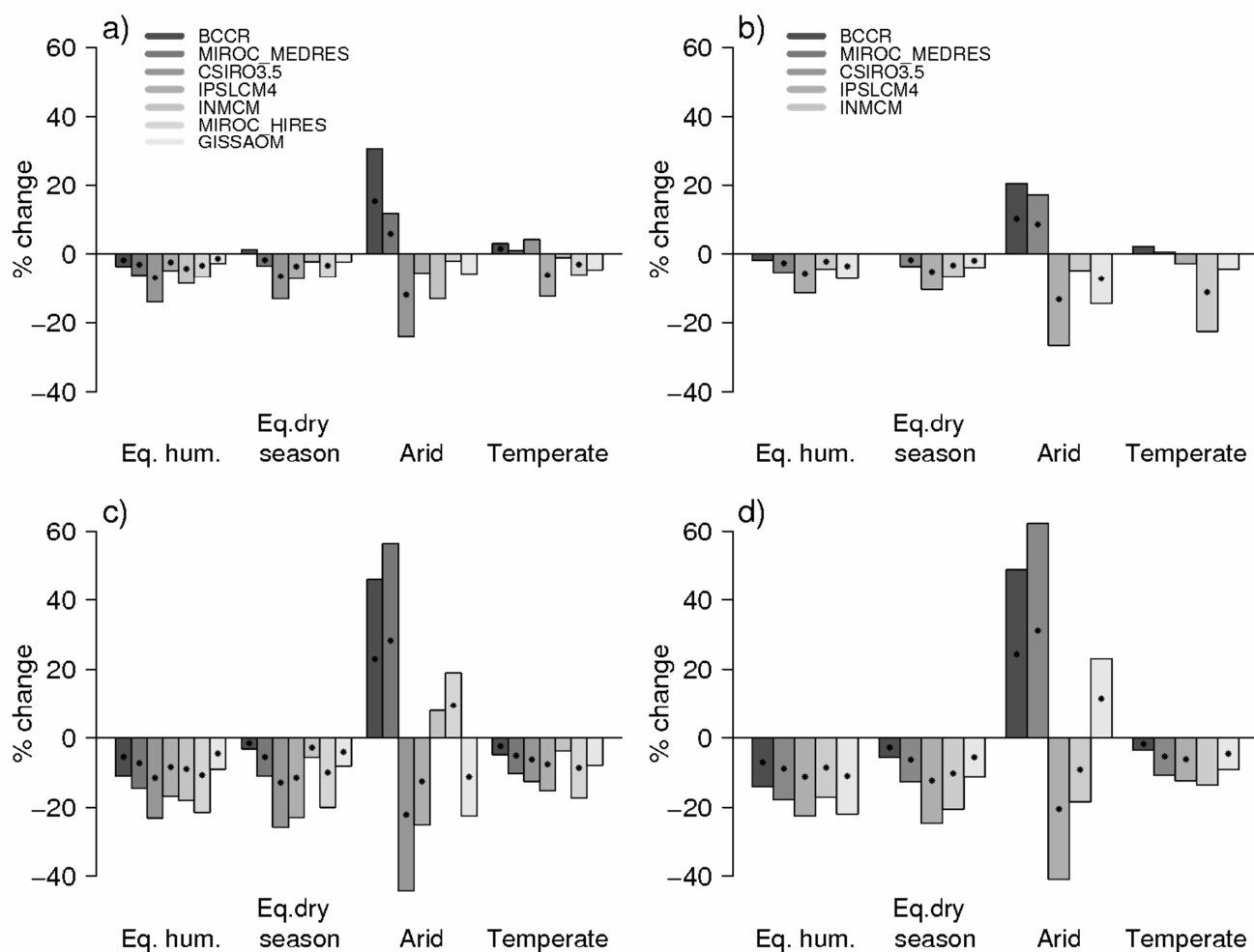


Fig.3: Average change, in %, between mean simulated yields over 2020-2049 and over 1970-1999, for the different Köppen zones and climate models, for the A1B scenario (a) and the A2 scenario (b). c and d: same as a and b, but for the difference between 2070-2099 and 1970-1999. Dots indicate significant mean yield changes (at a 5% level).

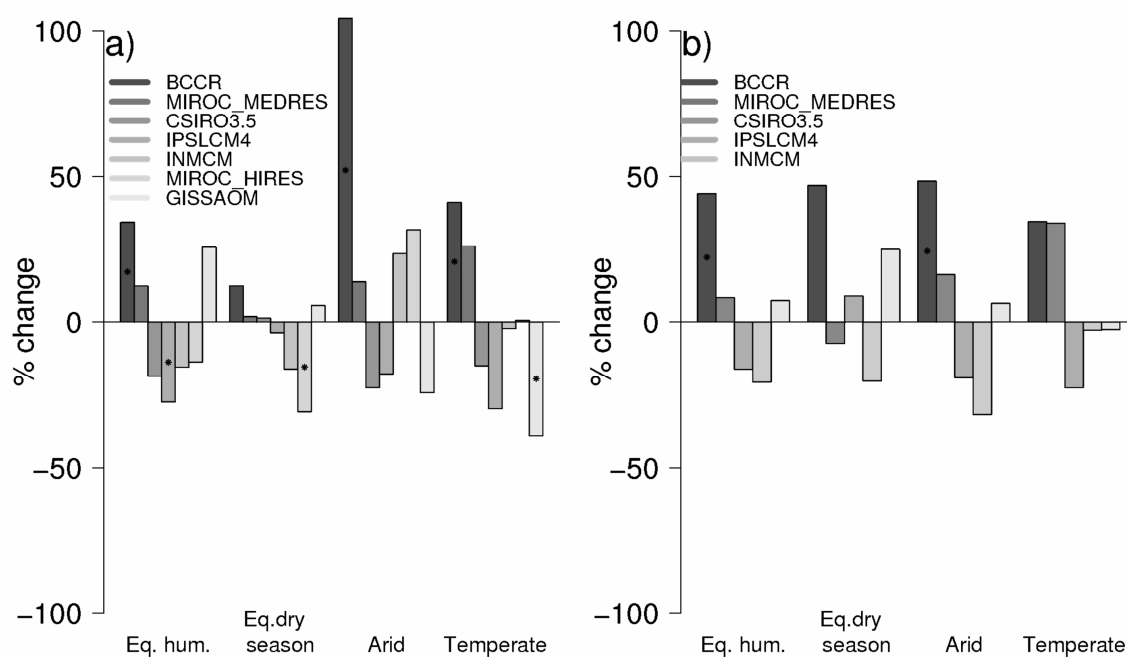


Fig.3bis: Average change, in %, between simulated yields variability (standard deviation) over 2070-2099 and over 1970-1999, for the different Köppen zones and climate models, for the A1B scenario (a) and the A2 scenario (b). Dots indicate significant variability changes (at a 5% level).

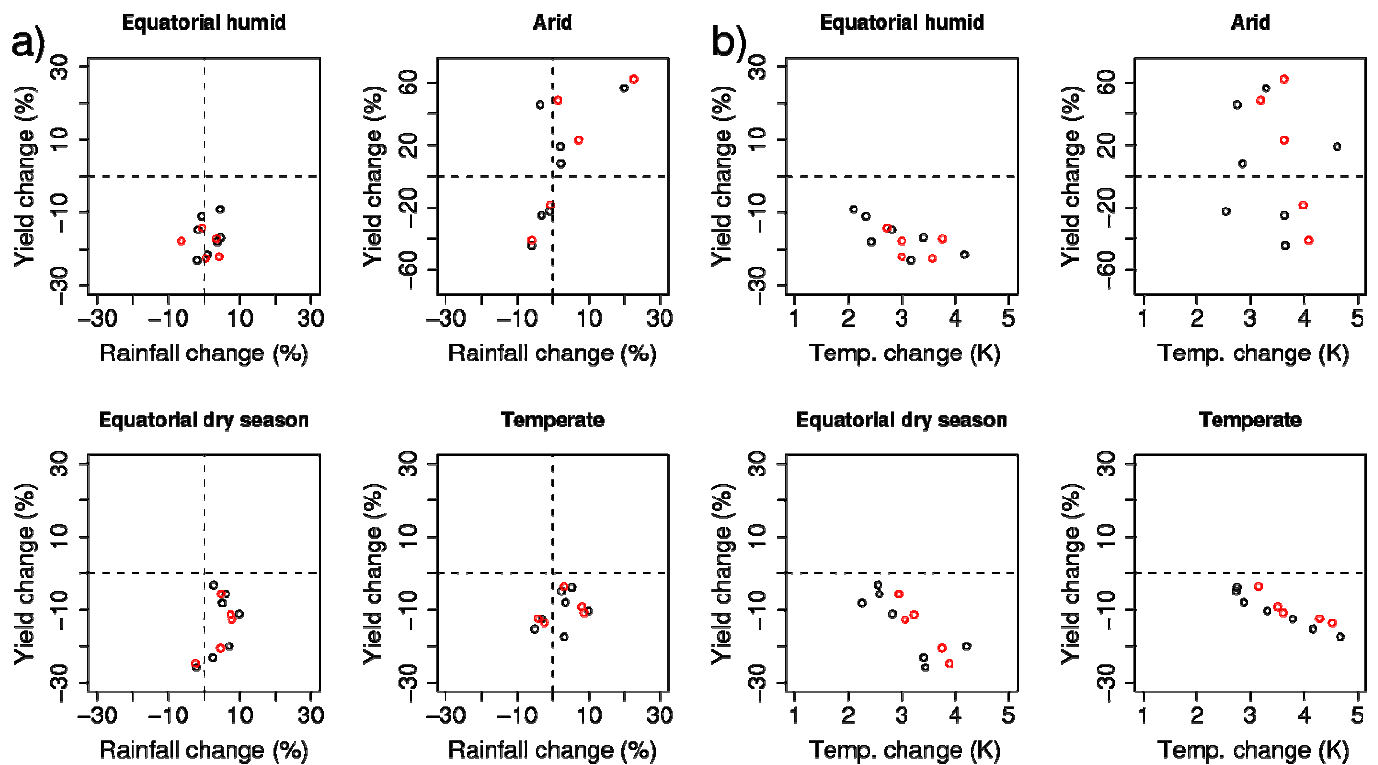


Fig.4: Simulated yield mean changes (between 2070-2099 and 1970-1999) as a function of projected rainfall changes (a) and temperature changes (b). The different panels correspond to different Köppen zones, the dots to the different climate models. Black dots are for the A1B scenario (7 models), red dots for the A2 scenario (5 models).

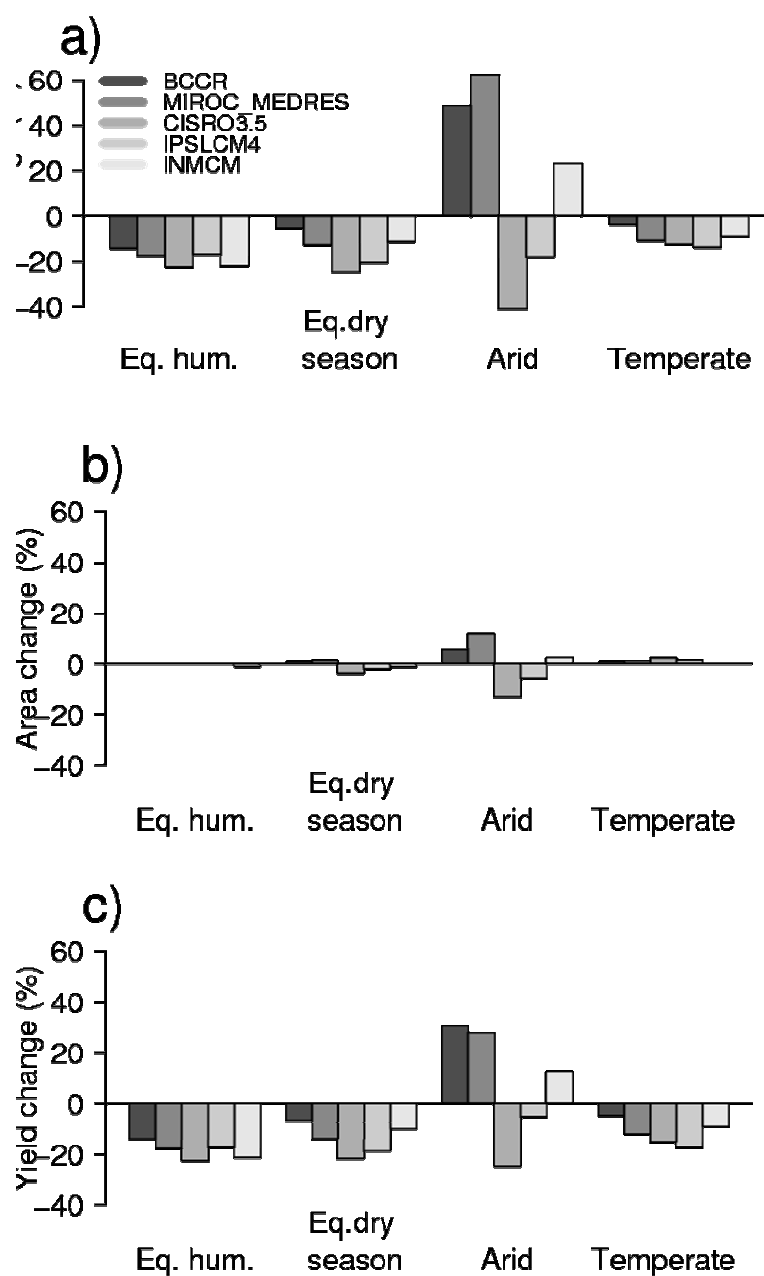


Fig.5: **a**: Average simulated yield change, in %, between 2070-2099 and 1970-1999 over the different Köppen zones and climate models (same as fig.3d); **b**: projected change in the relative fraction of the corresponding Köppen zone over which crops grow in the model; **c**: average simulated yield change, in %, over the different Köppen zones and climate models, when only considering the fraction of Köppen zones over which crop growth actually occurs. All three panels are for the A2 scenario.

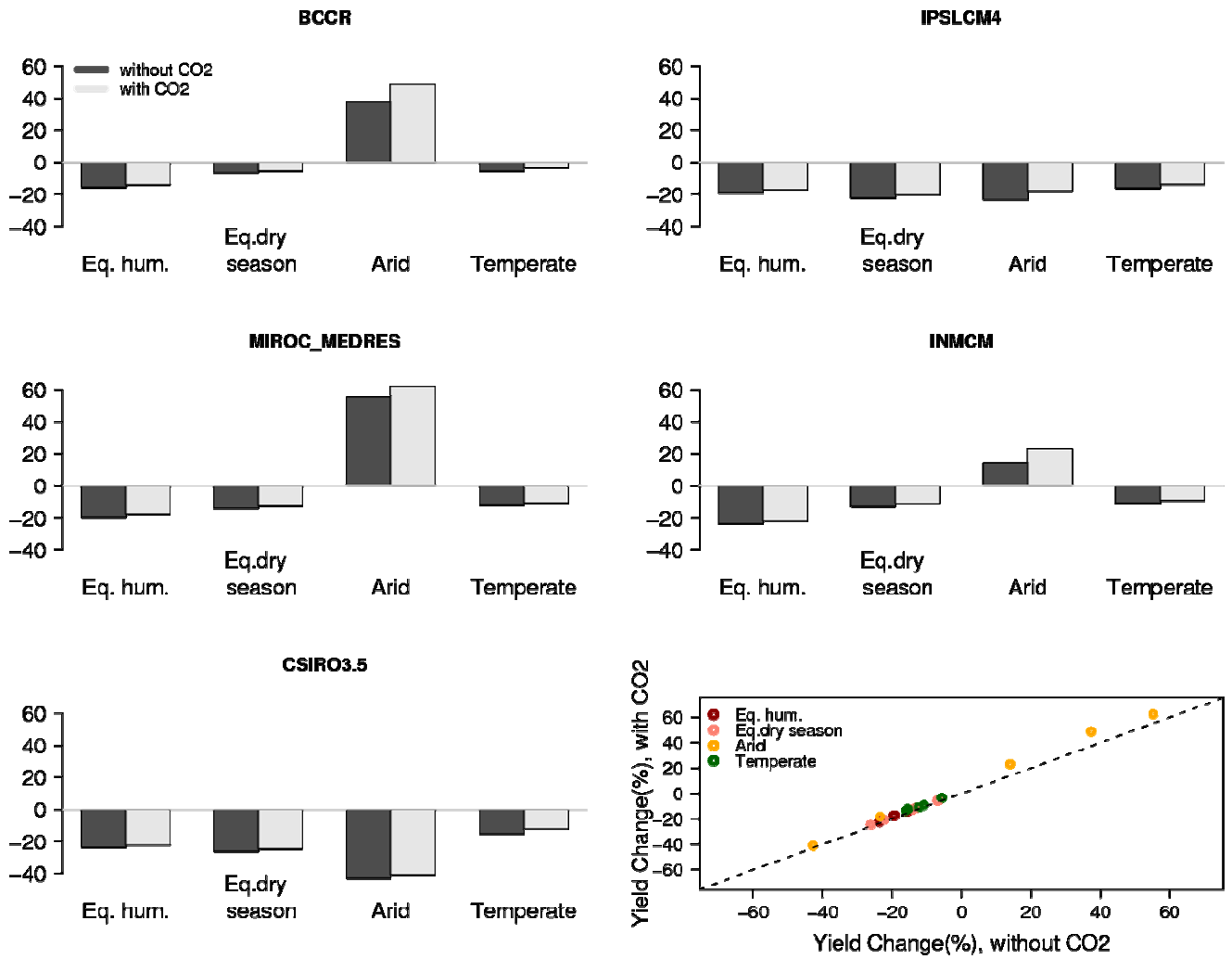


Fig.6: For the different models, projected yield change between 2070-2099 and 1970-1999 over the different Köppen zones with and without CO₂, for the A2 scenario. The bottom right panel shows the data from all the other panels on a XY plot.

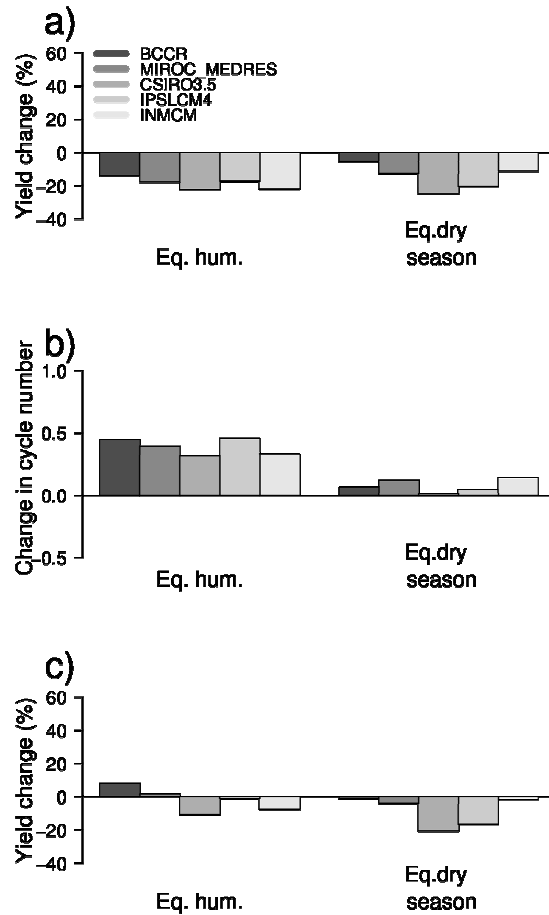


Fig.7: For both equatorial zones, in the different climate models, under the A2 scenario: **a** relative change in simulated yield between 2070-2099 and 1970-1999 (same as on fig.3d) – i.e., change in productivity per cycle; **b**: change in the average number of crop cycles per year (over the whole corresponding Köppen zone); **c**: integrated yield change accounting for the change in number of crop cycles (i.e., change in annual productivity).

Résumé

Dans ce troisième chapitre, on a utilisé ORCHIDEE-mil pour aborder, en zone tropicale, deux aspects de la problématique climat/agriculture : la rétroaction biogéophysique des zones cultivées sur le climat, et l'impact du changement climatique futur sur la productivité agricole.

Le premier aspect a été étudié sur l'Afrique de l'Ouest à l'aide d'une expérience idéalisée de couplage asynchrone surface/atmosphère (modèle LMDZ-OR), avec des conditions de végétation de surface représentant soit des cultures, soit des herbacées. Il s'agissait de voir dans quelle mesure une représentation plus réaliste des zones cultivées pouvait avoir une influence sur le climat simulé par le modèle d'atmosphère. Malgré un protocole expérimental maximisant la perturbation de surface (100% de couverture soit herbacée soit cultivée), cette simulation n'a pas permis de mettre en évidence un impact de la modification des flux surface/atmosphère, induite par le changement de végétation, sur la dynamique simulée des précipitations et de la mousson. Toutefois un certain nombre de limitations de cette expérience incitent à ne pas en tirer de conclusions génériques quant à l'importance de la représentation explicite des zones cultivées pour la simulation des interactions végétation/climat.

Le second aspect - l'impact du changement climatique futur sur la productivité agricole - a été étudié sur un domaine continental incluant l'Afrique et l'Inde, en forçant ORCHIDEE-mil par des simulations issues de différents modèles climatiques, produites pour le dernier rapport du GIEC (2007). L'analyse des simulations par ORCHIDEE-mil s'est faite sur une base bioclimatique, en utilisant une classification de Köppen simplifiée. On analyse donc le changement de potentiel productif climatique sur les différentes zones bioclimatiques d'ici la fin du siècle. L'analyse fait ressortir un impact négatif prédominant, cohérent au sein des différentes simulations, résultant de l'effet de l'augmentation de température sur la phénologie. Dans les zones sèches limitées en eau, en revanche, l'incertitude sur les projections en précipitation se propage aux simulations de rendements, avec des changements simulés importants et divergents au sein des différentes simulations. En conséquence, l'impact agrégé sur la zone varie entre -29% et +11% selon les modèles et scénarios climatiques, avec une moyenne de -6%. Notre étude ne fait pas ressortir d'impact important de l'augmentation de CO₂ atmosphérique sur les rendements. Bien que potentiellement non négligeables, il est important de nuancer l'échelle de ces impacts par rapport au très large potentiel d'augmentation des rendements qui existe dans ces régions à travers la modification et l'intensification des pratiques agricoles ; l'évolution de ces mêmes pratiques (variétés, calendriers culturaux, itinéraires techniques) peut aussi permettre de compenser en partie les impacts négatifs du changement climatique.

Conclusion générale et perspectives

Résumé des travaux réalisés et des principaux résultats

Depuis les débuts de la modélisation climatique, la représentation des surfaces continentales et de leurs interactions avec l'atmosphère dans les modèles de climat a peu à peu évolué pour inclure aujourd'hui le fonctionnement et la dynamique de la végétation globale. Cette thèse s'est construite sur l'idée que de tels modèles globaux de végétation, inclus au sein des modèles de climat, offraient la possibilité, fondamentalement, d'aborder les problématiques couplées liant climat et agriculture de façon cohérente au sein d'un seul et même cadre de modélisation : l'impact du climat sur les agrosystèmes, et la rétroaction des surfaces cultivées sur le climat. L'aspect qui nous a le plus intéressé, au cours de cette thèse, est l'utilisation d'un tel modèle dans une perspective de modélisation à grande échelle des impacts de la variabilité et du changement climatique sur la productivité agricole, en se focalisant sur les régions tropicales. On a donc développé une représentation des zones cultivées tropicales en C4 au sein d'un modèle global dynamique de végétation, ORCHIDEE, en lieu et place de la paramétrisation des herbacées naturelles qui tenaient lieu de cultures en C4 dans la version standard du modèle. Cette représentation s'est inspirée d'un modèle agronomique préexistant, SARRAH, représentant le mil et le sorgho, cultures en C4 représentatives des céréales tropicales.

- Simulations sur sites -

La nouvelle version du modèle, appelée ORCHIDEE-mil, a été développée et calibrée en se basant sur des simulations de référence de SARRAH sur le site expérimental de Bambey (Sénégal). La représentation du cycle saisonnier de la végétation est grandement améliorée par rapport à la version standard du modèle. On a également montré que le modèle se comporte de façon réaliste lorsqu'on le compare à des observations sur site en milieu paysan (Wankama), à la fois en termes de biomasse et de flux surface-atmosphère. Toutefois, la présence d'une végétation non-cultivée sur la parcelle de mil, qui n'est pas représentée par le modèle, induit des biais dans la simulation de ces flux. En conséquence, l'amélioration de la simulation des flux surface/atmosphère par rapport à la version standard d'ORCHIDEE n'est pas proportionnelle à l'amélioration de la simulation de la biomasse. Sur le site de Wankama, on a également vu qu'ORCHIDEE-mil, associé à la version du modèle développée spécifiquement pour les écosystèmes de savane ORCHIDEE-savannah, parvenait à reproduire les principales différences entre site cultivé et site naturel en termes de végétation et de flux surface-atmosphère. La comparaison entre les sites de Bambey et Wankama, i.e. un site expérimental et un site paysan, souligne l'importance de prendre en compte les pratiques culturales en milieu paysan (semis, densité du couvert végétal) pour parvenir à y simuler correctement le cycle de végétation. En particulier, prendre en compte le caractère extensif des pratiques culturales dans une zone comme le Sahel (faible densité des cultures) est nécessaire pour simuler le bon ordre de grandeur de la biomasse. Cette différence entre le rendement « climatique », potentiel, atteint en station expérimentale – tel que simulé par ORCHIDEE-mil – et le rendement réellement atteint en milieu paysan correspond au « yield gap », i.e. la part de rendement potentiel qui n'est pas réalisée du fait de limitations non-climatiques. Il résulte ici principalement de contraintes sur la fertilité des sols, et de l'adoption de pratiques culturales extensives qui en découle.

- Variabilité des rendements simulés à grande échelle -

A l'échelle régionale, l'analyse des rendements simulés par rapport aux observations à grande échelle (i.e., les données de rendement de la FAO) a montré que le modèle, ne prenant pas en compte dans ces simulations les contraintes sur la fertilité et les pratiques culturales, surestime de façon importante les rendements moyens observés. En revanche, au-delà de ce biais moyen le modèle représente bien la variabilité spatiale des rendements, et reproduit de façon significative leur variabilité temporelle (interannuelle). Sur l'Inde par exemple le modèle parvient à expliquer environ la moitié de la variance observée des rendements nationaux - ce qui est comparable aux résultats obtenus par d'autres modèles de modélisation agronomique à grande échelle, comme GLAM, sur la même région (Challinor et al. 2004). Ceci, couplé au fait que le modèle reproduit bien les relations observées entre climat et rendement, montre que le modèle représente bien l'impact à grande échelle du climat sur les zones cultivées. On a vu à cet égard que, fondamentalement, la notion d'échelle spatiale est importante pour l'analyse des relations entre climat et rendements : la performance du modèle a tendance à augmenter lorsqu'on considère des échelles plus grandes. Ainsi la corrélation entre rendements simulés et observés sur l'ensemble de la bande soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest est meilleure que celle obtenue pour la majorité des pays individuellement. On retrouve là aussi des résultats cohérents avec les études de Challinor et al. (2004) sur l'Inde.

- Sources d'incertitudes dans la simulation agronomique à grande échelle -

L'importance des données dans l'évaluation de la performance du modèle a également été analysée : à la fois les données climatiques utilisées pour forcer le modèle, et les données d'observations auxquelles les rendements simulés sont comparés.

Ainsi, on a pu montrer qu'une partie des erreurs du modèle dans la simulation de la variabilité interannuelle des rendements en Afrique de l'Ouest provenait du forçage climatique utilisé et de biais sur la représentation des pluies. D'une façon générale, la correction de ces biais de forçage améliore la performance du modèle ; plus précisément on a montré que certaines caractéristiques de la représentation des pluies étaient plus déterminantes que d'autres (sur cette région du moins) : en particulier, à l'échelle considérée, la performance du modèle dépend davantage de la bonne représentation des caractéristiques temporelles des pluies (fréquence, intensité) que contrairement à ce qu'on aurait pu attendre, de la variabilité intrasaisonnière (cycle saisonnier ou séquences journalières de pluies).

De même, on a montré que dans les régions considérées (Afrique), les données FAO présentaient aussi des incertitudes fortes. Il est alors délicat d'évaluer la performance du modèle : si ces données ne sont pas assez précises pour refléter l'impact de la variabilité climatique, alors il n'est pas pertinent de comparer à l'échelle interannuelle les rendements simulés, qui ne dépendent que des données climatiques de forçage, à ces observations.

D'une façon générale, la modélisation agronomique à grande échelle souffre donc de nombreuses incertitudes : en amont, sur la précision du forçage utilisé, à la fois en termes de climat mais aussi, par exemple, d'occupation des sols ; en aval, sur les données de validation ; et au niveau du modèle, sur l'adéquation entre la représentation unique, sur le domaine de simulation, des processus agronomiques tels que formulés dans le modèle, et la réalité des pratiques culturales (variétés, itinéraires techniques, etc...) qui peuvent varier fortement, sur ce domaine, à la fois spatialement et temporellement. Devant ces incertitudes, qui résultent intrinsèquement de l'échelle spatiale de modélisation, on ne peut attendre une performance de la modélisation agronomique à grande échelle similaire à celle de modèles agronomiques fonctionnant, par exemple, à l'échelle de la parcelle, où toutes ces incertitudes sont largement réduites. De fait, les quelques expériences de modélisation à grande échelle similaires à celles réalisées dans cette thèse, à notre connaissance, rapportent des résultats semblables à ceux obtenus ici : Smith et al. (2010b) obtiennent sur les différents pays d'Europe des corrélations

interannuelles entre rendements observés et simulés avec ORCHIDEE-STICS de l'ordre de 0.3 pour le blé, et de 0.5 pour le maïs, sur une période du même ordre de grandeur que dans nos analyses (1972-2003) ; Challinor et al. (2004) obtiennent avec GLAM une corrélation de 0.76 pour l'arachide en l'Inde, mais sur une période un peu plus courte (1966-1989) ; de même Iizumi et al. (2009) rapportent, avec le modèle MCWLA, des corrélations pour le maïs entre 0.4 et 0.8 à l'échelle de certaines provinces chinoises, mais uniquement sur 1985-2002. Les résultats présentés dans cette thèse – une corrélation entre rendements simulés et observés de 0.48 en l'Afrique de l'Ouest sur 1965-2000 et 0.68 en l'Inde sur (1961-1999) sont donc cohérents avec ce qui peut-être attendu d'une modélisation agronomique à grande échelle et plutôt satisfaisants au regard des performances obtenus par d'autres modèles.

Plutôt que des modèles de végétation mécanistes, certains auteurs préfèrent utiliser, pour la modélisation à grande échelle des impacts agronomiques du climat, des relations statistiques directes entre rendement et climat, établies à l'échelle nationale ou régionale (Lobell et al. 2008). En plus de la plus grande facilité d'application, on peut en effet défendre le point de vue que de tels modèles « boîte noire » intègrent empiriquement certaines des incertitudes mentionnées ci-dessus quant à la réponse à grande échelle des rendements au climat. Toutefois une telle approche souffre également d'importantes limitations, notamment par rapport à la prise en compte de certains effets non-climatiques (e.g., le CO₂), de la prise en compte de la variabilité intrasaisonnière, de la non-linéarité des liens climat/rendements, ou encore par rapport à la précision des données de calibration nécessaires (e.g., données de rendements à grande échelle). La question de la performance relative des approches mécanistes et statistiques, à différentes échelles, reste néanmoins une question ouverte, et nous l'avons discutée ici à l'aide de la comparaison des résultats obtenus sur les deux régions d'étude, Inde et Afrique de l'Ouest. Dans nos analyses, une relation statistique simple climat/rendement semble plus performante qu'ORCHIDEE-mil pour simuler la variabilité interannuelle des rendements sur l'Afrique de l'Ouest. Qui plus est, on a vu que de façon relativement contre-intuitive, une représentation plus réaliste de la variabilité intrasaisonnière dans le forçage climatique utilisé n'améliore pas la capacité du modèle à simuler, à grande échelle, la variabilité interannuelle des rendements sur cette région. A l'inverse, sur l'Inde une relation statistique semble moins performante que le modèle mécaniste. Sans aller jusqu'à une démonstration complète, nous avons suggéré que les performances relatives des deux approches dépendaient vraisemblablement des caractéristiques de la variabilité climatique sur la région considérée, en particulier de la variabilité intrasaisonnière.

- Projections de l'impact potentiel du changement climatique sur la productivité agricole -

Finalement, le modèle a été utilisé pour projeter l'évolution de la productivité agricole potentielle d'ici la fin du siècle sur la zone Afrique/Inde dans le contexte du changement climatique. Pour cela les simulations de certains des modèles couplés utilisés pour le dernier exercice du GIEC ont été utilisées pour forcer ORCHIDEE-mil. Une des particularités de notre étude est d'utiliser directement les sorties climatiques de ces modèles pour forcer ORCHIDEE-mil (i.e., sans utiliser la méthode des anomalies) : on s'affranchit alors des biais régionaux des modèles en analysant ensuite les simulations d'ORCHIDEE-mil selon une classification bioclimatique, et non géographique. Cette approche permet également de faire ressortir clairement les facteurs climatiques déterminant l'évolution des rendements. Les projections obtenues font ressortir qu'au-delà des précipitations, l'impact climatique majeur résulte en fait directement d'un effet moyen de la hausse des températures, à travers l'impact sur la phénologie simulée : cet effet est déterminant sur la majeure partie du domaine d'étude, et, du fait de la cohérence du réchauffement prévu par les différents modèles, cohérent au sein des différentes simulations. L'évolution des précipitations ne joue un rôle important que dans les zones arides : l'incertitude sur les projections de précipitation par les modèles de climat se

propage alors aux simulations de rendements, de sorte que les changements simulés divergent au sein des différentes simulations. En conséquence, malgré le signal cohérent dû aux températures, le signe et l'ampleur de l'impact agrégé sur la zone d'étude varient selon les modèles et scénarios climatiques, de -29 à +11 %. Ceci souligne que l'incertitude climatique (i.e., entre modèles de climat) est la source d'incertitude la plus importante dans ces projections – davantage que l'effet du scénario socio-économique, ou que l'effet du CO₂. Ce dernier a un effet minime sur les changements projetés : l'effet de l'augmentation du CO₂ n'est significatif que dans les zones arides (+6.8%), ce qui est cohérent avec l'impact attendu du CO₂ sur les cultures en C4 dans les Tropiques (Leakey et al. 2009). Même pour les projections d'évolution les plus négatives, l'impact potentiel du changement climatique sur les rendements doit néanmoins aussi être considéré à la lumière des possibilités d'adaptation des pratiques culturales, et, en particulier pour la zone africaine, des possibilités importantes d'augmentation des rendements à travers notamment l'adoption de pratiques plus intensives et l'utilisation plus importante d'intrants. Dans des régions comme l'Afrique de l'Ouest, les agronomes ont en effet souligné de longue date que l'écart entre les rendements moyens actuels et les rendements potentiellement atteignables pouvait atteindre un facteur supérieur à 3 ou 4, que cet écart résultait avant tout de contrainte sur la fertilité des sols et les pratiques culturales qui en découlaient, et qu'il pouvait être significativement comblé par l'apport, même modeste, de fertilisation minérale et organique. Dans ce contexte, l'impact potentiel du changement climatique peut être plus que compensé par l'évolution des pratiques culturales. Toutefois, en l'absence de telles évolutions, le changement climatique imposera vraisemblablement une pression supplémentaire sur un système alimentaire déjà soumis à de fortes tensions, notamment du fait de la croissance démographique extrêmement importante attendue dans ces régions dans les prochaines décennies.

- Impact d'une représentation plus réaliste des zones cultivées sur le climat simulé -

Au-delà de la problématique des impacts climatiques sur l'agriculture, nous avons aussi voulu analyser dans cette thèse l'apport d'une meilleure représentation des zones cultivées tropicales à la simulation des interactions surface/atmosphère : en effet, par rapport à la version d'origine d'ORCHIDEE représentant les zones cultivées par des herbacées naturelles, une représentation plus réaliste de la végétation cultivée peut modifier les flux surface/atmosphère dans le modèle, et donc potentiellement, lorsque le modèle fonctionne en mode couplé avec l'atmosphère, les conditions atmosphériques simulées. ORCHIDEE-mil n'étant ici pas couplé avec LMDZ, cette problématique a été abordée à l'aide d'une expérience idéalisée de couplage asynchrone surface/atmosphère, sur l'Afrique de l'Ouest, avec des conditions de végétation de surface représentant soit des cultures (ORCHIDEE-mil), soit des herbacées (ORCHIDEE). Malgré un protocole expérimental maximisant la perturbation de surface (100% de couverture soit herbacée, soit cultivée), cette simulation n'a pas permis de mettre en évidence un impact de la modification des flux surface/atmosphère, induite par le changement de végétation, sur la dynamique simulée des précipitations et de la mousson ouest-africaine. Cela ne doit toutefois pas laisser penser que l'approximation des zones cultivées par des herbacées, sur cette région, est sans conséquences pour la simulation du climat et de ses interactions avec la végétation : en effet le protocole de cette expérience de sensibilité reste relativement frustré, notamment du fait de la faiblesse de la perturbation apportée au regard de l'échelle globale des simulations effectuées, de la mauvaise représentation de la mousson ouest-africaine dans le modèle d'atmosphère, ainsi que de la faible résolution utilisée, qui ne permet pas de prendre compte les processus de variabilité climatique à petite échelle qui sont importants dans cette région (e.g., Taylor et al. 2008). Des études plus fines sont donc nécessaires ici. On a également pu souligner que d'autres groupes de modélisation rapportent un impact important des différences herbacées/cultures sur le

climat simulé par un modèle couplé surface/atmosphère – en particulier dans des régions où le contraste herbacées/cultures est plus marqué (e.g., Amazonie ; Costa et al. 2007).

Perspectives

- Perspectives à court terme : validation, développement et approfondissement de certains résultats -

En termes de suites à donner au travail effectué au cours de cette thèse, un certain nombre de points abordés offrent des perspectives assez immédiates. En premier lieu, la validation du modèle devrait être poursuivie sur site de Wankama avec les années plus récentes pour lesquelles de nouvelles données ont été obtenues – ce site est en effet à notre connaissance le seul site de mesure complet (météorologie, végétation, flux) en milieu tropical, sur du mil : l'opportunité unique qu'il offre devrait donc être exploitée au maximum. Tester le modèle sur de plus nombreuses années permettrait de renforcer la robustesse des conclusions présentées dans le premier chapitre.

Un certain nombre de développements supplémentaires du modèle apparaissent également souhaitables au vu de ce qui a été présenté ici. En premier lieu, une paramétrisation prenant en compte la diversité des niveaux d'intensité des pratiques culturales au sein du domaine de simulation devrait être développée, afin de réduire le biais moyen du modèle en termes de biomasse et rendement simulés. En l'absence d'une modélisation explicite des cycles biogéochimiques associés (azote, phosphore), cela peut passer par la prescription d'un facteur empirique affectant la quantité de biomasse simulée. Dans LPJ-mL par exemple, Bondeau et al. (2007) utilisent les données de fertilisation par pays de l'IFA (2002) pour recalibrer le LAI maximum, et donc le rendement, qui peut être atteint par les différents types de cultures dans les différents pays. On peut noter à cet égard que Potter et al. (2010) ont tout récemment proposé une désagrégation spatiale de ces mêmes données pour fournir des cartes explicites de niveaux de fertilisation minérale et organique, qui ont explicitement vocation à être utilisées dans le contexte de la modélisation agronomique à grande échelle.

Un autre axe de développement nécessaire serait de calculer les pratiques culturales, telles que le choix de la variété (sa longueur de cycle par exemple), en fonction du climat : cela permettrait de simuler la variabilité spatiale de ces pratiques sous le climat actuel, tout en étant capable de simuler leur évolution future en réponse à l'évolution du climat, c'est-à-dire de simuler dans une certaine mesure l'adaptation des pratiques culturales au changement climatique. Des efforts ont été faits dans ce sens, au cours de cette thèse, pour par exemple adapter la longueur de cycle de la variété simulée à la longueur de la saison des pluies sur le pixel considéré, ainsi qu'à l'évolution de cette saison des pluies au cours du temps (en cas de changement du climat) ; toutefois on n'a pu ici aboutir à une version opérationnelle, et les simulations présentées dans cette thèse ont été réalisées avec une longueur de cycle fixe en degré.jours (correspondant donc, malgré tout, à une durée absolue en jours variable selon la température moyenne locale).

A l'échelle régionale et en termes de variabilité des rendements simulés, une hypothèse soulevée dans le chapitre II explique la performance différente du modèle en Afrique de l'Ouest et en Inde, par rapport à une relation statistique climat/rendement, par le poids différent de la variabilité climatique intrasaisonnière dans les deux régions. Cette hypothèse pourrait être testée en répétant sur l'Inde une partie du schéma expérimental développé sur l'Afrique de l'Ouest dans l'article publié dans *GRL* : la comparaison entre des simulations d'ORCHIDEE-mil forcé par des pluies observées, et forcé par des pluies observées auxquelles on aurait retiré la chronologie intrasaisonnière, permettrait d'évaluer l'importance

de la variabilité intrasaisonnière pour la simulation des rendements à grande échelle en Inde. Un jeu de données de pluies journalières observées sur l'Inde est disponible au LOCEAN pour une telle étude.

Enfin, la simulation en couplage asynchrone sur l'Afrique de l'Ouest présentée dans le chapitre III pourrait également facilement être affinée, par exemple en utilisant une version « zoomée » de LMDz – ou bien en étendant, de façon encore plus théorique, la zone de perturbation (i.e., la zone où l'on prescrit des différences de végétation) à toute l'Afrique, de façon à ce que la perturbation apportée au modèle soit davantage significative par rapport à l'échelle globale du modèle et sa résolution.

- Utilisation d'ORCHIDEE-mil -

En l'état, ORCHIDEE-mil offre de nombreuses perspectives d'utilisation. On a essentiellement abordé dans cette thèse la problématique des impacts du climat sur la productivité agricole : il est possible d'utiliser ORCHIDEE-mil pour étudier plus largement, au-delà de l'impact sur les seuls rendements, l'effet du climat, et de l'évolution de l'usage des sols par exemple, sur le bilan hydrique et les cycles biogéochimiques dans les régions tropicales cultivées. En particulier, les aspects liés au cycle du carbone n'ont été que peu abordés ici : or, à grande échelle, une des conséquences principales des changements d'usage des sols est la modification du cycle du carbone. L'expansion des zones cultivées au détriment de la végétation naturelle correspond généralement à une source nette de carbone ; mais les agrosystèmes déjà en place offrent également un potentiel important, à travers la gestion des pratiques culturales, de séquestration du carbone. Les zones cultivées doivent donc être prises en compte dans l'établissement du bilan de carbone des écosystèmes. De tels bilans sont aujourd'hui menés à l'échelle continentale en région tropicale, comme par exemple au sein du projet CarboAfrica (Ciais et al. 2008). Un modèle tel qu'ORCHIDEE-mil peut apporter une contribution significative à de telles études par sa représentation explicite des zones cultivées et des processus biogéochimiques associés, qui permet donc de calculer l'impact de l'expansion de ces zones sur le cycle du carbone. On a vu au chapitre I que, même si l'analyse des flux de carbone montrait que la validité des processus liés au carbone simulés par ORCHIDEE-mil devait être approfondie, le modèle permettait déjà, associé à la version ORCHIDEE-savannah, de représenter correctement certaines des principales différences entre végétation naturelle et cultivée en milieu sahélien. Ce cadre de modélisation offre donc des possibilités intéressantes pour étudier l'impact de l'évolution de l'occupation des sols sur les bilans de carbone, d'eau et d'énergie dans cette région, et à plus grande échelle en milieu tropical.

En termes d'étude des impacts du climat sur la productivité agricole, une des perspectives, au sortir de cette thèse, serait de reproduire et actualiser l'étude du chapitre III avec les nouvelles projections climatiques produites dans le cadre du 5^{ème} rapport du GIEC, afin de tirer profit des derniers développements de la modélisation climatique. D'autre part, certains auteurs suggèrent que le spectre d'incertitude de ces nouvelles projections sera supérieur à celui des simulations du 4^{ème} rapport, du fait de la plus grande complexité des modèles utilisés (Trenberth 2010) : il sera alors nécessaire de transcrire cette incertitude au niveau des impacts sur l'agriculture. ORCHIDEE-mil, de par sa compatibilité avec le format et l'échelle des simulations climatiques, est un outil idéal pour cela ; on a vu en effet au chapitre III qu'un des avantages d'ORCHIDEE-mil était de pouvoir assez directement être forcé par une série de différents modèles et scénarios climatiques. Une des nouveautés attendues du 5^{ème} rapport du GIEC est également la réalisation par les différents groupes de modélisation climatique de simulations à l'échelle décennale. Le concept et les outils de la prévision climatique décennale sont, bien sûr, encore en plein développement, et la capacité des modèles de climat à fournir des projections climatiques pertinentes à cette échelle-là reste à établir ; mais dans le

cas où de telles simulations apparaîtraient capables d'apporter une information, même minimale, fiable à cette échelle de temps, on pourrait envisager d'utiliser un modèle comme ORCHIDEE-mil pour évaluer dans quelle mesure de telles projections pourraient être traduites en projections agronomiques à court terme.

A des échelles de temps plus courtes encore, un des aspects des impacts climatiques sur l'agriculture qui n'a pas été abordé dans cette thèse est celui de la prévision saisonnière. En effet, dans des régions de mousson comme l'Afrique de l'Ouest, la prévision saisonnière des anomalies pluviométriques présente en général de bonnes performances, et des systèmes opérationnels sont déjà en place, tel que le système PRESAO pour Afrique de l'Ouest. Cette variabilité annuelle des précipitations peut avoir des impacts importants sur les agro-écosystèmes (cultures et pâturages), et donc des conséquences graves sur la sécurité alimentaire des populations. De nombreux auteurs ont souligné le potentiel qu'offre ce type de prévisions, combinées à la modélisation agronomique, pour anticiper les impacts climatiques et informer les décideurs agricoles (politiques, agriculteurs) (e.g., Hansen et al. 2006). Une des perspectives, dans ce contexte, serait donc d'évaluer dans quelle mesure ORCHIDEE-mil permettrait de fournir, en se basant sur ces prévisions, une information agronomique pertinente à l'échelle saisonnière sur cette région, en se basant par exemple sur des prévisions saisonnières « hindcastées » et en comparant aux observations les anomalies de rendement ainsi simulées à grande échelle.

Enfin, on a souligné, dans l'étude de la section 2 du chapitre III, l'incertitude des projections agronomiques issues des différentes études, provenant en particulier des différents modèles agronomiques utilisés et de l'incertitude sur les processus représentés (par exemple, l'effet CO₂). Un des axes fondamentaux pour mieux documenter cette incertitude serait de procéder à des inter-comparaisons de modèles agronomiques, de la même manière que les modèles de climat sont inter-comparés pour évaluer les sources d'incertitude des projections climatiques. Le projet international AgMIP (The Agriculture Model Intercomparison and Improvement Project), dédié en partie à l'inter-comparaison des modèles agronomiques dans le cadre des projections d'impacts climatiques et qui est actuellement en phase de lancement, offrirait à cet égard un cadre intéressant pour comparer ORCHIDEE-mil à d'autres outils de modélisation et mieux évaluer la robustesse des résultats présentés ici.

- Perspectives à plus long terme : 1°) l'agriculture au sein d'ORCHIDEE -

On a suggéré au cours de cette thèse que la modélisation développée ici pouvait à grande échelle s'appliquer de façon générale aux céréales tropicales en C4 que sont le mil, le sorgho, le maïs, en les considérant dans un même ensemble. L'horizon de cette thèse était de s'en tenir à ce développement : développer une représentation complète des différentes cultures tropicales nécessiterait de prendre en compte d'autres cultures importantes que sont les tubercules (igname, manioc), la canne à sucre, le soja, et surtout le riz – ou encore les cultures ligneuses (palmiers à huile, fruits). Cela mènerait alors à se poser la question de la stratégie générale de représentation de l'agriculture dans ORCHIDEE à l'échelle globale : il s'agit là en particulier de définir le degré de détail souhaitable, en termes de nombre et de caractéristiques des différents PFTs culturaux, au regard de l'échelle d'application du modèle (régionale, globale) et des objectifs de modélisation (études d'impact, ou des rétroactions climatiques) – question qui restait donc au-delà de l'horizon de cette thèse. D'après les données de la FAO, en termes de surface cultivée moyenne sur 2000-2007, les quelques cultures les plus importantes, à l'échelle globale, sont, par ordre décroissant : blé, riz, maïs, soja, orge, sorgho, mil, coton, pois, colza, arachide, tournesol, canne à sucre - représentant près de 75% des surfaces cultivées (cependant la canne à sucre représente très largement la première culture en termes de biomasse récoltée). Il faut cependant noter qu'au contraire des herbacées naturelles pour lesquelles la correspondance est assez bonne, la division des

cultures en PFT en C3 et PFT en C4, dans ORCHIDEE, ne correspond pas nécessairement à une séparation entre zones tempérées et zones tropicales (respectivement) : certaines cultures en C4 ont été abondamment adoptées aux moyennes latitudes (maïs), et certaines cultures en C3 sont abondamment présentes aux latitudes tropicales (soja, riz). On s'est contenté ici d'utiliser le cadre existant d'ORCHIDEE (PFT agricole en C4) pour représenter un type de céréales agricoles typiques des zones tropicales (mil/sorgho) : l'articulation de ce travail avec les développements déjà réalisés dans ORCHIDEE-STICS pour l'agriculture tempérée (maïs, blé, soja), et ceux en cours de réalisation, également avec ORCHIDEE-STICS, pour des plantes comme la canne à sucre (thèse d'Aude Valade), pour obtenir une représentation complète de l'agriculture à l'échelle du globe, reste, au sortir de cette thèse, une question ouverte. L'enjeu est de trouver le bon compromis entre coût-modèle et niveau de détail nécessaire au vu des objectifs de modélisation. On proposera ici (tableau ci-dessous) une organisation possible des PFTs supplémentaires à rajouter pour cela à ORCHIDEE, au regard des espèces les plus importantes, de leur physiologie et de leurs particularités culturelles. Couplée à une prescription spatiale explicite des niveaux d'intensification des pratiques agricoles, cela permettrait de représenter de façon réaliste la majeure partie des zones cultivées globales au sein d'ORCHIDEE.

PFT	Espèces agricoles principales (<i>particularités</i>)
Céréales C3	Blé, orge, et assimilés
Céréales C4	Mais, sorgho, mil
Canne à sucre	Canne à sucre (<i>culture semi-pérenne, croissance toute l'année, rendement constitué des tiges</i>)
Riz	Riz (<i>photosynthèse en C3, mais cultures immergées avec émission de méthane</i>)
Légumineuses	Soja, arachide, pois (<i>photosynthèse en C3, mais fixation du N2 atmosphérique, donc pas de limitation en azote</i>)
Oléagineux	Colza, tournesol

PFTs agricoles supplémentaires et principales cultures correspondantes pour représenter l'essentiel des zones cultivées globales dans ORCHIDEE.

- Perspectives à plus long terme : 2°) interactions avec le climat -

Une des conditions nécessaires pour étudier les rétroactions sur le climat des zones cultivées avec un modèle comme ORCHIDEE-mil est le couplage du modèle avec l'atmosphère. Un tel couplage n'a pas été réalisé au cours de cette thèse : il en constitue une des perspectives importantes.

A l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, l'expérience de couplage asynchrone menée dans cette thèse n'a pas suggéré un rôle important de la représentation réaliste des surfaces cultivées pour la simulation du climat et des interactions climat/végétation. Toutefois, un couplage d'ORCHIDEE-mil avec l'atmosphère permettrait d'aborder cette problématique de façon bien plus adaptée : en particulier, il est possible que l'impact d'une différence de conditions de surface apparaisse plus nettement dans le cadre d'une modélisation couplée avec végétation agricole interactive. Un tel couplage permettrait donc de mettre réellement en lumière l'importance éventuelle de la prise en compte des zones cultivées dans la simulation des interactions biogéophysiques végétation/climat en région tropicale ; le cas échéant, utiliser la version actuelle d'ORCHIDEE-mil couplée à un modèle d'atmosphère permettrait d'étudier, sur l'Afrique par exemple, le rôle des surfaces cultivées et de l'évolution de l'usage des sols

sur le climat et la variabilité climatique régionale en intégrant pour la première fois une description réaliste de ces zones cultivées.

Plus largement, en parallèle avec une description plus complète des cultures tropicales dans ORCHIDEE telle que suggérée ci-dessus, le couplage avec l'atmosphère permettrait d'aborder certaines problématiques spécifiques des rétroactions biogéophysiques liant climat et agriculture.

Par exemple, une des rétroactions potentiellement importantes des zones agricoles sur le climat, au-delà de l'effet du changement de végétation naturelle/cultivée, est celle de la gestion humaine de ces surfaces, en particulier de l'irrigation. En effet, à l'échelle locale l'irrigation modifie de façon importante le bilan d'énergie de surface et les conditions atmosphériques, ce qui peut avoir un impact sur la dynamique atmosphérique à plus grande échelle. Ces effets commencent à être étudiés avec des modèles couplés surface/atmosphère de grande échelle (e.g., Sacks et al. 2008, Puma et al. 2010) ; au sein de l'IPSL Matthieu Guimberteau a ainsi, pendant sa thèse, utilisé ORCHIDEE pour montrer qu'en Inde, région où, sur certaines cultures, elle est très développée, l'irrigation avait pour effet de retarder la date de mise en place de la mousson. Toutefois la plupart de ces études n'incluent pas une végétation interactive : le cycle saisonnier de végétation (le LAI) y est prescrit. Elles n'intègrent donc pas l'effet de l'irrigation sur la végétation, et l'impact subséquent de cette modification de la végétation (par l'irrigation) sur les flux surface-atmosphère et les conditions atmosphériques. Dans ce contexte, utiliser, sur l'Inde par exemple, un modèle tel qu'ORCHIDEE-mil représentant les cultures soumises à irrigation dans cette région, permettrait d'ajouter cette composante interactive, tout en représentant de façon réaliste la végétation agricole et donc en affinant le diagnostic des rétroactions végétation/atmosphère. On pourrait alors envisager de comparer, par exemple, l'impact direct de l'irrigation sur la productivité agricole et l'impact indirect via l'effet sur le climat. Un outil comme ORCHIDEE-mil permettrait d'aborder ces questions de façon cohérente du point de vue de la modélisation.

Plus généralement on peut avancer qu'un agro-DGVM incluant une représentation complète de l'agriculture constituerait un outil idéal pour étudier les conséquences environnementales globales (climat, eau, cycles biogéochimiques) de l'usage des sols et de ses évolutions majeures, passées ou futures – par exemple les conséquences d'un développement à grande échelle des agrocarburants, ou de l'utilisation massive de biomasse comme source d'énergie. En particulier, en fonctionnement couplé à un modèle de climat, il permettrait d'intégrer la rétroaction climatique associée, biogéochimique et biogéophysique. A cet égard, une perspective intéressante ouverte par ce type de modélisation est de pouvoir étudier l'impact du changement climatique sur l'agriculture dans un système couplé, incluant la rétroaction des zones cultivées sur le climat. En effet, on a déjà eu l'occasion de souligner que les projections climatiques fournies par les modèles du dernier rapport du GIEC n'intégraient pas l'effet sur le climat des modifications des conditions de surface (végétation) associées à l'évolution projetée de l'usage des sols. Or ces modifications peuvent altérer le climat régional de façon significative – par exemple à travers l'effet de la déforestation sur le cycle de l'eau : l'évolution du climat résultant de l'expansion des zones cultivées peut alors avoir elle-même un impact sur le fonctionnement de ces zones cultivées. Ramankutty et al. (2006) ont ainsi suggéré que l'évolution historique de l'usage des sols avait eu un impact négatif sur les « ressources climatiques » des agrosystèmes. Utiliser un agro-DGVM global couplé à un modèle de climat permettrait, en prescrivant uniquement l'évolution attendue de l'usage des sols, de simuler de façon intégrée : l'impact sur le climat du fonctionnement et de l'expansion des zones cultivées, d'une part ; et l'impact sur la productivité agricole d'un climat *ayant vu* la modification des conditions de surface, d'autre part. Cela permettrait d'aborder de façon cohérente, du point de vue de la modélisation, la question de l'impact climatique de

l'expansion des zones cultivées sur la productivité agricole : autrement dit, l'évolution de l'occupation des sols se fait-elle au profit ou au détriment de la productivité agricole globale ? On pourrait ainsi aller jusqu'à envisager quels scénarios socio-économiques futurs d'évolution de l'occupation des sols offrirait le meilleur « retour » climatique.

Références

- Adegoke, J.; Pielke Sr, R.; Eastman, J.; Mahmood, R. & Hubbard, K. (2003), 'Impact of irrigation on midsummer surface fluxes and temperature under dry synoptic conditions: A regional atmospheric model study of the US High Plains', *Monthly Weather Review* **131**(3), 556--564.
- Ainsworth, E.; Leakey, A.; Ort, D. & Long, S. (2008), 'FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply', *New Phytologist* **179**(1), 5--9.
- Arneth, A.; Sitch, S.; Bondeau, A.; Butterbach-Bahl, K.; Foster, P.; Gedney, N.; Noblet-Ducoudre, N. & Prentice, I. (2010), 'From biota to chemistry and climate: towards a comprehensive description of trace gas exchange between the biosphere and atmosphere', *Biogeosciences* **7**(1), 121--149.
- Arnold, J. & others (1994), *SWAT (Soil and Water Assessment Tool)*, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service.
- Bala, G.; Caldeira, K.; Wickett, M.; Phillips, T.; Lobell, D.; Delire, C. & Mirin, A. (2007), 'Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation', *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**(16), 6550.
- Barnston, A. & Schickedanz, P. (1984), 'The Effect of Irrigation on Warm Season Precipitation in the Southern Great Plains.', *Journal of Applied Meteorology* **23**, 865--888.
- Baron, C.; Reyniers, F.; Clopes, A. & Forest, F. (1999), 'Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques = Application of the SARRA software to the study of climatic risks', *Agriculture et développement* (24), 89--97.
- Baron, C.; Sultan, B.; Balme, M.; Sarr, B.; Traore, S.; Lebel, T.; Janicot, S. & Dingkuhn, M. (2005), 'From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**(1463), 2095.
- Bationo, A.; Christianson, C.; Baethgen, W. & Mokuwunye, A. (1992), 'A farm-level evaluation of nitrogen and phosphorus fertilizer use and planting density for pearl millet production in Niger', *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **31**(2), 175--184.
- Bationo, A.; Christianson, C. & Klaij, M. (1993), 'The effect of crop residue and fertilizer use on pearl millet yields in Niger', *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **34**(3), 251--258.
- Bationo, A.; Kihara, J.; Vanlauwe, B.; Waswa, B. & Kimetu, J. (2007), 'Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems', *Agricultural Systems* **94**(1), 13--25.
- Battisti, D. & Naylor, R. (2009), 'Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat', *Science* **323**(5911), 240.

- Betts, R. (2001), 'Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature change and radiative forcing', *Atmospheric Science Letters* **2**(1-4), 39--51.
- Betts, R. (2005), 'Integrated approaches to climate–crop modelling: needs and challenges', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **360**(1463), 2049.
- Biasutti, M. & Giannini, A. (2006), 'Robust Sahel drying in response to late 20th century forcings', *Geophys. Res. Lett* **33**(10.1029).
- Bonan, G. (1995), 'Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model', *Journal of Geophysical Research* **100**(D2), 2817--2831.
- Bonan, G. (2008), 'Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests', *science* **320**(5882), 1444.
- Bondeau, A.; Smith, P.; Zaehle, S.; Schaphoff, S.; Lucht, W.; Cramer, W.; Gerten, D.; Lotze-Campen, H.; Müller, C.; Reichstein, M. & others (2007), 'Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance', *Global Change Biology* **13**(3), 679--706.
- Bonfils, C. & Lobell, D. (2007), 'Empirical evidence for a recent slowdown in irrigation-induced cooling', *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**(34), 13582.
- Boote, K.; Jones, J. & Hoogenboom, G. (1998), 'Simulation of crop growth: CROPGRO model', Eds. Marcel Dekker.
- Borlaug, N. (2002), 'Feeding a world of 10 billion people: the miracle ahead', *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant* **38**(2), 221--228.
- Botta, A.; Viovy, N.; Ciais, P.; Friedlingstein, P. & Monfray, P. (2000), 'A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data', *Global Change Biology* **6**(7), 709--725.
- Boucher, O.; Myhre, G. & Myhre, A. (2004), 'Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate', *Climate Dynamics* **22**(6), 597--603.
- Boulain, N.; Cappelaere, B.; Ramier, D.; Issoufou, H.; Halilou, O.; Seghieri, J.; Guillemain, F.; Oi, M.; Gignoux, J. & Timouk, F. (2009), 'Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated Sahel-2. Vegetation and carbon dynamics', *Journal of Hydrology* **375**(1-2), 190--203.
- Bounoua, L.; DeFries, R.; Collatz, G.; Sellers, P. & Khan, H. (2002), 'Effects of land cover conversion on surface climate', *Climatic Change* **52**(1), 29--64.
- Brisson, N.; Ruget, F.; Gate, P.; Lorgeou, J.; Nicoullaud, B.; Tayot, X.; Plenet, D.; Jeuffroy, M.; Bouthier, A.; Ripoche, D. & others (2002), 'STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize', *Agronomie* **22**(1), 69--92.
- Brovkin, V.; Claussen, M.; Driesschaert, E.; Fichefet, T.; Kicklighter, D.; Loutre, M.; Matthews, H.; Ramankutty, N.; Schaeffer, M. & Sokolov, A. (2006), 'Biogeophysical effects

of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity', *Climate Dynamics* **26**(6), 587--600.

Brovkin, V.; Claussen, M.; Petoukhov, V. & Ganopolski, A. (1998), 'On the stability of the atmosphere-vegetation system in the Sahara/Sahel region', *Journal of Geophysical Research* **103**(D24), 31613.

Brovkin, V.; Ganopolski, A.; Claussen, M.; Kubatzki, C. & Petoukhov, V. (1999), 'Modelling climate response to historical land cover change', *Global Ecology and Biogeography* **8**(6), 509--517.

Budyko, M. (1974), *Climate and life*, Academic Press.

Challinor, A.; Ewert, F.; Arnold, S.; Simelton, E. & Fraser, E. (2009), 'Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation', *Journal of Experimental Botany* **60**(10), 2775.

Challinor, A.; Wheeler, T.; Craufurd, P.; Slingo, J. & Grimes, D. (2004), 'Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops', *Agricultural and Forest Meteorology* **124**(1-2), 99--120.

Challinor, A.; Wheeler, T.; Slingo, J.; Craufurd, P. & Grimes, D. (2005), 'Simulation of Crop Yields Using ERA-40: Limits to Skill and Nonstationarity in Weather-Yield Relationships', *Journal of Applied Meteorology* **44**(4), 516--531.

Charney, J.; Stone, P. & Quirk, W. (1975), 'Drought in the Sahara-A biogeophysical feedback mechanism', *Science* **187**, 434.

Chase, T.; Pielke Sr, R.; Kittel, T.; Baron, J. & Stohlgren, T. (1999), 'Potential impacts on Colorado Rocky Mountain weather due to land use changes on the adjacent Great Plains', *Journal of Geophysical Research* **104**(D14), 16673.

Chipanshi, A.; Ripley, E. & Lawford, R. (1999), 'Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model', *Agricultural Systems* **59**(1), 57--66.

Choisnel, E. (1977), 'Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol', *La Météorologie* **6**(11), 103--133.

Christy, J.; Norris, W.; Redmond, K. & Gallo, K. (2006), 'Methodology and results of calculating Central California surface temperature trends: Evidence of human-induced climate change?', *Journal of Climate* **19**(4), 548--563.

Ciais, P.; Reichstein, M.; Viovy, N.; Granier, A.; Ogee, J.; Allard, V.; Aubinet, M.; Buchmann, N.; Bernhofer, C.; Carrara, A. & others (2005), 'Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003', *Nature* **437**(7058), 529--533.

Ciais, P.; Piao, S.; Cadule, P.; Friedlingstein, P. & Chedin, A. (2008), 'Variability and recent trends in the African carbon balance', *Biogeosciences Discussions* **5**(4), 3497--3532.

Claussen, M. & Gayler, V. (1997), 'The greening of the Sahara during the mid-Holocene:

results of an interactive atmosphere-biome model', *Global Ecology and Biogeography Letters* **6**(5), 369--377.

Claussen, M.; Kubatzki, C.; Brovkin, V.; Ganopolski, A.; Hoelzmann, P. & Pachur, H. (1999), 'Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the mid-Holocene', *Geophysical Research Letters* **26**(14), 2037--2040.

Collatz, G.; Ribas-Carbo, M. & Berry, J. (1992), 'Coupled photosynthesis- stomatal conductance model for leaves of C4 plants', *Australian Journal of Plant Physiology* **19**(5), 519--538.

Collomb, P. (1999), 'Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici a 2050', publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. FAO-Economica.

Cook, K. & Vizy, E. (2006), 'Coupled model simulations of the West African monsoon system: Twentieth-and twenty-first-century simulations', *Journal of climate* **19**(15), 3681--3703.

Costa, M.; Yanagi, S.; Souza, P.; Ribeiro, A. & Rocha, E. (2007), 'Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion', *Geophysical Research Letters* **34**(7), L07706.

Cox, P.; Betts, R.; Bunton, C.; Essery, R.; Rowntree, P. & Smith, J. (1999), 'The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity', *Climate Dynamics* **15**(3), 183--203.

Cramer, W.; Bondeau, A.; Woodward, F.; Prentice, I.; Betts, R.; Brovkin, V.; Cox, P.; Fisher, V.; Foley, J.; Friend, A. & others (2001), 'Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models', *Global Change Biology* **7**(4), 357--373.

Dai, A.; Lamb, P.; Trenberth, K.; Hulme, M.; Jones, P. & Xie, P. (2004), 'The recent Sahel drought is real', *International Journal of Climatology* **24**(11), 1323--1331.

Davin, E.; de Noblet-Ducoudré, N. & Friedlingstein, P. (2007), 'Impact of land cover change on surface climate: Relevance of the radiative forcing concept', *Geophysical Research Letters* **34**(13), L13702.

Davin, E. (2008), 'Etude de l'effet biophysique du changement d'occupation des sols sur le système climatique', thèse de doctorat, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, France.

De Rosnay, P. & Polcher, J. (1998), 'Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM', *Hydrology and Earth System Sciences* **2**, 239--255.

DeFries, R. & Achard, F. (2002), 'New estimates of tropical deforestation and terrestrial carbon fluxes: results of two complementary', *LUCC Newsletter* ([www. geo. ucl. ac. be/LUCC/publications/luccnews/newsletter. html](http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/publications/luccnews/newsletter.html)).

Defries, R.; Bounoua, L. & Collatz, G. (2002), 'Human modification of the landscape and

surface climate in the next fifty years', *Global Change Biology* **8**(5), 438--458.

Dickinson, R. (1984), 'Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models', *Climate Processes and Climate Sensitivity* **5**, 58--72.

Dickinson, R. & Henderson-Sellers, A. (1988), 'Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parametrizations', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **114**(480), 439--462.

van Diepen, C.; Wolf, J.; Keulen, H. & Rappoldt, C. (1989), 'WOFOST: a simulation model of crop production', *Soil Use and Management* **5**(1), 16--24.

Dingkuhn, M.; Sow, A.; Samb, A.; Diack, S. & Asch, F. (1995), 'Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel-I. Photothermal and micro-climatic responses of flowering', *Agricultural Systems* **48**(4), 385--410.

Dingkuhn, M. & Asch, F. (1999), 'Phenological responses of *Oryza sativa*, *O. glaberrima* and inter-specific rice cultivars on a toposequence in West Africa', *Euphytica* **110**(2), 109--126.

Dingkuhn, M.; Baron, C.; Bonnal, V.; Maraun, F.; Sarr, B.; Sultan, B.; Clopes, A. & Forest, F. (2003), 'Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales', *Decision Support Tools for Smallholder Agriculture in Sub-Saharan Africa A Practical Guide*, 127.

Douglas, E.; Beltrán-Przekurat, A.; Niyogi, D.; Pielke Sr, R. & Vörösmarty, C. (2009), 'The impact of agricultural intensification and irrigation on land-atmosphere interactions and Indian monsoon precipitation--A mesoscale modeling perspective', *Global and Planetary Change* **67**(1-2), 117--128.

Douville, H.; Salas-Mélia, D. & Tyteca, S. (2006), 'On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming', *Climate Dynamics* **26**(4), 367--385.

Ducoudré, N.; Laval, K. & Perrier, A. (1993), 'SECHIBA, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land-Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General Circulation Model.', *Journal of Climate* **6**, 248--273.

Evans, L. (1997), 'Adapting and improving crops: the endless task', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **352**(1356), 901.

Farquhar, G.; Caemmerer, S. & Berry, J. (1980), 'A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C 3 species', *Planta* **149**(1), 78--90.

Feddema, J.; Oleson, K.; Bonan, G.; Mearns, L.; Buja, L.; Meehl, G. & Washington, W. (2005), 'The importance of land-cover change in simulating future climates', *Science* **310**(5754), 1674.

Feddema, J.; Oleson, K.; Bonan, G.; Mearns, L.; Washington, W.; Meehl, G. & Nychka, D. (2005), 'A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncertainty in present-day land cover representations', *Climate Dynamics* **25**(6), 581--609.

- Findell, K.; Shevliakova, E.; Milly, P. & Stouffer, R. (2007), 'Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate', *Journal of Climate* **20**(14), 3621--3634.
- Foley, J.; Coe, M.; Scheffer, M. & Wang, G. (2003), 'Regime shifts in the Sahara and Sahel: interactions between ecological and climatic systems in Northern Africa', *Ecosystems* **6**(6), 524--532.
- Foley, J.; Costa, M.; Delire, C.; Ramankutty, N. & Snyder, P. (2003), 'Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate', *Frontiers in Ecology and the Environment* **1**(1), 38--44.
- Foley, J.; Levis, S.; Prentice, I.; Pollard, D. & Thompson, S. (1998), 'Coupling dynamic models of climate and vegetation', *Global Change Biology* **4**(5), 561--579.
- Foley, J.; Prentice, I.; Ramankutty, N.; Levis, S.; Pollard, D.; Sitch, S. & Haxeltine, A. (1996), 'An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics', *Global Biogeochemical Cycles* **10**(4), 603--628.
- Fowler, W. & Helvey, J. (1974), 'Effect of large-scale irrigation on climate in the Columbia Basin', *Science* **184**(4133), 121.
- Friedlingstein, P.; Bopp, L.; Rayner, P.; Cox, P.; Betts, R.; Jones, C.; Von Bloh, W.; Brovkin, V.; Cadule, P.; Doney, S. & others (2006), 'Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison', *Journal of Climate* **19**(14), 3337--3353.
- Friedlingstein, P.; Joel, G.; Field, C. & Fung, I. (1999), 'Toward an allocation scheme for global terrestrial carbon models', *Global Change Biology* **5**(7), 755--770.
- Gervois, S.; de Noblet-Ducoudré, N.; Viovy, N.; Ciais, P.; Brisson, N.; Seguin, B. & Perrier, A. (2004), 'Including Croplands in a Global Biosphere Model: Methodology and Evaluation at Specific Sites', *Earth Interactions* **8**(16), 1--25.
- Gervois, S.; Ciais, P.; de Noblet-Ducoudré, N.; Brisson, N.; Vuichard, N. & Viovy, N. (2008), 'Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century', *Global Biogeochemical Cycles* **22**(2).
- Giannini, A.; Saravanan, R. & Chang, P. (2003), 'Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales', *Science* **302**(5647), 1027.
- GIEC (2007) : Changements climatiques : éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Publié sous la direction de S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Jr.. Publié par le GIEC, Genève, Suisse, 2007.
- GIEC, Résumé à l'intention des décideurs du Groupe de travail II (2007). In: Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J.

van der Linden and C.E. Hanson, (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

Gornall, J.; Betts, R.; Burke, E.; Clark, R.; Camp, J.; Willett, K. & Wiltshire, A. (2010), 'Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **365**(1554), 2973.

Govindasamy, B.; Duffy, P. & Caldeira, K. (2001), 'Land use changes and Northern Hemisphere cooling', *Geophysical research letters* **28**(2), 291--294.

Griffon, M. (2006), 'Nourrir la planète', *Paris, Eds. Odile Jacob*.

Griffon, M. & Weber, J. (1996), 'Les aspects économiques et institutionnels de la Révolution Doublement Verte', *CIRAD-URPA; Fondation Prospective et Innovation. Vers une révolution doublement verte. Actes=[Towards a doubly green revolution. Proceedings]. Poitiers: CIRAD-URPA*, 167--198. Séminaire vers une révolution doublement verte, 1995-11-08/1995-11-09, Poitiers, France.

Hansen, J. & Jones, J. (2000), 'Scaling-up crop models for climate variability applications', *Agricultural Systems* **65**(1), 43--72.

Hansen, J.; Challinor, A.; Ines, A.; Wheeler, T. & Moron, V. (2006), 'Translating climate forecasts into agricultural terms: advances and challenges', *Climate Research* **33**(1), 27.

Haskett, J.; Pachepsky, Y. & Acock, B. (1995), 'Estimation of soybean yields at county and state levels using GLYCIM: A case study for Iowa', *Agronomy journal* **87**(5), 926--931.

Held, I.; Delworth, T.; Lu, J.; Findell, K. & Knutson, T. (2005), 'Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **102**(50), 17891.

Heuvelink, G. (1998), 'Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale', *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **50**(1), 255--264.

Hoerling, M.; Hurrell, J.; Eischeid, J. & Phillips, A. (2006), 'Detection and attribution of twentieth-century northern and southern African rainfall change', *Journal of climate* **19**(16), 3989--4008.

Houndénou C., (1999) : *Variabilité pluviométrique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostique et modélisation*. Thèse de Doctorat de Géographie. UMR 5080, CNRS « Climatologie de l'Espace Tropical », Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie. 390 p.

van den Hoof, C. & Vidale, P. (2008), 'Towards a Process-based Representation of Annual Crops Within the Land Surface Model JULES', AGU Spring Meeting Abstracts.

Houghton, R. (2003), 'Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850--2000', *Tellus B* **55**(2), 378--390.

Hourdin, F.; Musat, I.; Bony, S.; Braconnot, P.; Codron, F.; Dufresne, J.; Fairhead, L.;

Filiberti, M.; Friedlingstein, P.; Grandpeix, J. & others (2006), 'The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection', *Climate Dynamics* **27**(7), 787--813.

IFA (2002), 'Fertilizer Use by Crop', 5th edn; <http://www.fertilizer.org/ifa/statistics.asp>. Rome, International Fertilizer Industry Association.

Iizumi, T.; Yokozawa, M. & Nishimori, M. (2009), 'Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: application of a Bayesian approach', *Agricultural and Forest Meteorology* **149**(2), 333--348.

Jagtap, S. & Jones, J. (2002), 'Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production', *Agriculture, Ecosystems & Environment* **93**(1-3), 73--85.

Jones, P. & Thornton, P. (2003), 'The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055', *Global Environmental Change* **13**(1), 51--59.

Keating, B.; Carberry, P.; Hammer, G.; Probert, M.; Robertson, M.; Holzworth, D.; Huth, N.; Hargreaves, J.; Meinke, H.; Hochman, Z. & others (2003), 'An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation', *European Journal of Agronomy* **18**(3-4), 267--288.

Koster, R.; Dirmeyer, P.; Guo, Z.; Bonan, G.; Chan, E.; Cox, P.; Gordon, C.; Kanae, S.; Kowalczyk, E.; Lawrence, D. & others (2004), 'Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation', *Science* **305**(5687), 1138.

Kottke, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B. & Rubel, F. (2006), 'World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated', *Meteorologische Zeitschrift* **15**(3), 259--264.

Krinner, G.; Viovy, N.; de Noblet-Ducoudré, N.; Ogée, J.; Polcher, J.; Friedlingstein, P.; Ciais, P.; Sitch, S. & Prentice, I. (2005), 'A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system', *Global Biogeochemical Cycles* **19**(1), 1--33.

Kropelin, S.; Verschuren, D.; Lézine, A.; Eggermont, H.; Cocquyt, C.; Francus, P.; Cazet, J.; Fagot, M.; Rumes, B.; Russell, J. & others (2008), 'Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years', *Science* **320**(5877), 765.

Krysanova, V.; Hattermann, F. & Wechsung, F. (2005), 'Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment', *Hydrological processes* **19**(3), 763--783.

Kucharik, C. & Brye, K. (2003), 'IBIS yield and nitrate leaching predictions for Wisconsin maize agroecosystems receiving varied N-fertilizer', *Journal of Environmental Quality* **32**, 247--268.

Leakey, A. (2009), 'Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel', *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **276**(1666), 2333.

- Lee, E.; Chase, T.; Rajagopalan, B.; Barry, R.; Biggs, T. & Lawrence, P. (2009), 'Effects of irrigation and vegetation activity on early Indian summer monsoon variability', *International Journal of Climatology* **29**(4), 573--581.
- Levis, S.; Bonan, G. & Kucharik, C. (2008), 'Dynamic Crop Life Cycles in the CCSM', AGU Fall Meeting Abstracts.
- Liu, J.; Fritz, S.; Van Wesenbeeck, C.; Fuchs, M.; You, L.; Obersteiner, M. & Yang, H. (2008), 'A spatially explicit assessment of current and future hotspots of hunger in Sub-Saharan Africa in the context of global change', *Global and Planetary Change* **64**(3-4), 222--235.
- Liu, Z.; Wang, Y.; Gallimore, R.; Gasse, F.; Johnson, T.; DeMenocal, P.; Adkins, J.; Notaro, M.; Prentice, I.; Kutzbach, J. & others (2007), 'Simulating the transient evolution and abrupt change of Northern Africa atmosphere-ocean-terrestrial ecosystem in the Holocene', *Quaternary Science Reviews* **26**(13-14), 1818--1837.
- Lobell, D. & Field, C. (2007), 'Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming', *Environmental Research Letters* **2**, 014002.
- Lobell, D. & Bonfils, C. (2008), 'The effect of irrigation on regional temperatures: A spatial and temporal analysis of trends in California, 1934-2002', *Journal of Climate* **21**(10), 2063--2071.
- Lobell, D.; Burke, M.; Tebaldi, C.; Mastrandrea, M.; Falcon, W. & Naylor, R. (2008), 'Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030', *Science* **319**(5863), 607.
- Lokupitiya, E.; Denning, S.; Paustian, K.; Baker, I.; Schaefer, K.; Verma, S.; Meyers, T.; Bernacchi, C.; Suyker, A. & Fischer, M. (2009), 'Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchanges from croplands', *Biogeosciences* **6**, 1103.
- Long, S.; Ainsworth, E.; Leakey, A.; Nosberger, J. & Ort, D. (2006), 'Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations', *Science* **312**(5782), 1918.
- Lu, J. & Delworth, T. (2005), 'Oceanic forcing of the late 20th century Sahel drought', *Geophysical Research Letters* **32**(22), L22706.
- Mahmood, R.; Hubbard, K. & Carlson, C. (2004), 'Modification of growing-season surface temperature records in the northern great plains due to land-use transformation: verification of modelling results and implication for global climate change', *International Journal of Climatology* **24**(3), 311--327.
- Mahmood, R.; Foster, S.; Keeling, T.; Hubbard, K.; Carlson, C. & Leeper, R. (2006), 'Impacts of irrigation on 20th century temperature in the northern Great Plains', *Global and Planetary Change* **54**(1-2), 1--18.
- Manabe, S. (1969), 'Climate and the ocean circulation', *Monthly Weather Review* **97**(11), 739-

-774.

McPherson, R.; Stensrud, D. & Crawford, K. (2004), 'The impact of Oklahoma's winter wheat belt on the mesoscale environment', *Monthly Weather Review* **132**(2), 405--421.

Mishra, A.; Hansen, J.; Dingkuhn, M.; Baron, C.; Traoré, S.; Ndiaye, O. & Ward, M. (2008), 'Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso', *Agricultural and Forest Meteorology* **148**(11), 1798--1814.

Monfreda, C.; Ramankutty, N. & Foley, J. (2008), 'Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000', *Global Biogeochemical Cycles* **22**(1).

Monteith, J. (1972), 'Solar radiation and productivity in tropical ecosystems', *Journal of Applied Ecology*, 747--766.

Murty, M.; Singh, P.; Wani, S.; Khairwal, I. & Srinivas, K. (2007), 'Yield gap analysis of sorghum and pearl millet in India using simulation modeling', *Global Theme on Agroecosystems-Report*(37), ICRISAT, Patancheru, Andhra Pradesh.

Müller, C. & Lucht, W. (2007), 'Robustness of terrestrial carbon and water cycle simulations against variations in spatial resolution', *Journal of Geophysical Research* **112**(D6), D06105.

Ngo-Duc, T.; Polcher, J. & Laval, K. (2005), 'A 53-year forcing data set for land surface models', *Journal of Geophysical Research* **110**(D6), D06116.

Organisation des Nations unies (2001), 'World Population Prospects : the 2000 Revision'. Department of Economic and Social Affairs, New York.

Organisation des Nations unies (2006), 'Perspectives de la population mondiale - La Révision de 2006' - Résumé [archive], - Département des affaires économiques et sociales, 2007, p. 1 du document ou 19 du PDF.

Osborne, T.; Lawrence, D.; Challinor, A.; Slingo, J. & Wheeler, T. (2007), 'Development and assessment of a coupled crop-climate model', *Global Change Biology* **13**(1), 169--183.

Parton, W.; Stewart, J. & Cole, C. (1988), 'Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model', *Biogeochemistry* **5**(1), 109--131.

Pielke Sr, R. (2001), 'Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall', *Reviews of Geophysics* **39**(2), 151--177.

Pielke Sr, R. & others (2007), 'A new paradigm for assessing the role of agriculture in the climate system and in climate change', *Agricultural and Forest Meteorology* **142**(2-4), 234--254.

Potter, P.; Ramankutty, N.; Bennett, E. & Donner, S. (2010), 'Characterizing the spatial patterns of global fertilizer application and manure production', *Earth Interactions* **14**(2), 1--22.

- Prentice, I.; Cramer, W.; Harrison, S.; Leemans, R.; Monserud, R. & Solomon, A. (1992), 'Special paper: a global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate', *Journal of Biogeography* **19**(2), 117--134.
- Puma, M. & Cook, B. (2010), 'Effects of irrigation on global climate during the 20th century', *Journal of Geophysical Research* **115**(D16), D16120.
- Ramankutty, N. (2004), 'Croplands in West Africa: a geographically explicit dataset for use in models', *Earth Interactions* **8**(23), 1--22.
- Ramankutty, N.; Delire, C. & Snyder, P. (2006), 'Feedbacks between agriculture and climate: an illustration of the potential unintended consequences of human land use activities', *Global and Planetary Change* **54**(1-2), 79--93.
- Ramankutty, N.; Evan, A.; Monfreda, C. & Foley, J. (2008), 'Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000', *Global Biogeochemical Cycles* **22**(1), 1--19.
- Ramier, D.; Boulain, N.; Cappelaere, B.; Timouk, F.; Rabanit, M.; Lloyd, C.; Boubkraoui, S.; Métayer, F.; Descroix, L. & Wawrzyniak, V. (2009), 'Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated Sahel-1. Energy and water', *Journal of Hydrology* **375**(1-2), 204--216.
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor, 2007: Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Renssen, H.; Brovkin, V.; Fichefet, T. & Goosse, H. (2006), 'Simulation of the Holocene climate evolution in Northern Africa: the termination of the African Humid Period', *Quaternary International* **150**(1), 95--102.
- Reyniers, F. (1994), 'Esquisse d'hydrosystème céréaliier soudano-sahélien valorisant les précipitations', *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Montrouge: John Libbey Eurotext*, 79--89.
- Ritchie, J. & Otter, S. (1985), 'Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model', In: *ARS Wheat Yield Project. ARS-38*, Natl Tech Info Serv, Springfield, Missouri (1985), pp. 159--175.
- Roudier, P., Sultan, S., Quirion, P., Berg., A., 'The impact of future climate change on West African crop yields: what does the recent literature say?' in revision for *Global Environmental Change*.
- Ruddiman, W. (2003), 'The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago', *Climatic Change* **61**(3), 261--293.

- Ruddiman, W. (2007), 'The early anthropogenic hypothesis: Challenges and responses', *Reviews of Geophysics* **45**(4).
- Ruimy, A.; Dedieu, G. & Saugier, B. (1996), 'TURC: a diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity', *Global Biogeochemical Cycles* **10**(2), 269--285.
- Sacks, W.; Cook, B.; Buening, N.; Levis, S. & Helkowski, J. (2009), 'Effects of global irrigation on the near-surface climate', *Climate dynamics* **33**(2), 159--175.
- Samba, A.; Sarr, B.; Baron, C.; Gozé, E.; Maraux, F.; Clerget, B. & Dingkuhn, M. (2001), 'La prévision agricole a l'échelle du Sahel', *Modélisation des agro-écosystèmes et aide a la décision. Montpellier: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad); Institut national de la recherche agronomique (Inra)*, 243--62.
- Sampaio, G.; Nobre, C.; Costa, M.; Satyamurty, P.; Soares-Filho, B. & Cardoso, M. (2007), 'Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion', *Geophysical Research Letters* **34**(17), L17709.
- Schlenker, W. & Lobell, D. (2010), 'Robust negative impacts of climate change on African agriculture', *Environmental Research Letters* **5**, 014010.
- Scholze, M.; Bondeau, A.; Ewert, F.; Kucharik, C.; Priess, J. & Smith, P. (2005), 'Advances in large-scale crop modeling', *EOS Transactions* **86**, 245--247.
- Scholze, M.; Knorr, W.; Arnell, N. & Prentice, I. (2006), 'A climate-change risk analysis for world ecosystems', *Proceedings of the National Academy of Sciences* **103**(35), 13116.
- Sellers, P.; Dickinson, R.; Randall, D.; Betts, A.; Hall, F.; Berry, J.; Collatz, G.; Denning, A.; Mooney, H.; Nobre, C. & others (1997), 'Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere', *Science* **275**(5299), 502.
- Sellers, P.; Mintz, Y.; Sud, Y. & Dalcher, A. (1986), 'Simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models', *Journal of Atmospheric Sciences* **43**(6).
- Sellers, P.; Randall, D.; Collatz, G.; Berry, J.; Field, C.; Dazlich, D.; Zhang, C.; Collelo, G. & Bounoua, L. (1996), 'A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation', *Journal of Climate* **9**(4), 676--705.
- Sitch, S.; Smith, B.; Prentice, I.; Arneth, A.; Bondeau, A.; Cramer, W.; Kaplan, J.; Levis, S.; Lucht, W.; Sykes, M. & others (2003), 'Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model', *Global Change Biology* **9**(2), 161--185.
- Sitch, S.; Brovkin, V.; von Bloh, W.; van Vuuren, D.; Eickhout, B. & Ganopolski, A. (2005), 'Impacts of future land cover changes on atmospheric CO₂ and climate', *Global Biogeochemical Cycles* **19**(2).
- Sitch, S.; Huntingford, C.; Gedney, N.; Levy, P.; Lomas, M.; Piao, S.; Betts, R.; Ciais, P.; Cox, P.; Friedlingstein, P. & others (2008), 'Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future

plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs)', *Global Change Biology* **14**(9), 2015--2039.

Smith, P.; Ciais, P.; Peylin, P.; De Noblet-Ducoudré, N.; Viovy, N.; Meurdesoif, Y. & Bondeau, A. (2010a), 'European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: 2. Interannual yields and anomalous CO₂ fluxes in 2003', *Journal of Geophysical Research* **115**(G4), G04028.

Smith, P.; De Noblet-Ducoudré, N.; Ciais, P.; Peylin, P.; Viovy, N.; Meurdesoif, Y. & Bondeau, A. (2010b), 'European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: Phenology and productivity', *Journal of Geophysical Research* **115**(G1), G01014.

Snyder, M.; Kueppers, L.; Sloan, L.; Cavan, D.; Jin, J.; Kanamaru, H.; Miller, N.; Tyree, M.; Du, H. & Weare, B. (2006), 'Regional climate effects of irrigation and urbanization in the western united states: a model intercomparison', .

Sow, C. & Diagne, G. (1998), 'Sensibilité du logiciel DHC4 a la variabilité des précipitations a Bambey (Sénégal)', *Science et changements planétaires/Sécheresse* **9**(4).

Sultan, B.; Baron, C.; Dingkuhn, M.; Sarr, B. & Janicot, S. (2005), 'Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon', *Agricultural and forest meteorology* **128**(1-2), 93--110.

Thornton, P.; Lamarque, J.; Rosenbloom, N. & Mahowald, N. (2007), 'Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO₂ fertilization and climate variability', *Global Biogeochemical Cycles* **21**(4), 1--15.

Trenberth, K. (2010), 'More knowledge, less certainty', *Nature Reports Climate Change*, 20--21.

Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Tubiello, F.; Amthor, J.; Boote, K.; Donatelli, M.; Easterling, W.; Fischer, G.; Gifford, R.; Howden, M.; Reilly, J. & Rosenzweig, C. (2007), 'Crop response to elevated CO₂ and world food supply: A comment on', *European Journal of Agronomy* **26**(3), 215--223.

Viovy, N. (1996), 'Interannuality and CO₂ sensitivity of the SECHIBA-BGC coupled SVAT-BGC model', *Physics and Chemistry of The Earth* **21**(5-6), 489--497.

Voldoire, A. (2006), 'Quantifying the impact of future land-use changes against increases in GHG concentrations', *Geophysical Research Letters* **33**, L04701.

Penning de Vries, FWT. ; Jansen, DM.; Ten Berge, HFM. & Bakema, A. (1989), 'Simulation

of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops', *PUDOC Wageningen, The Netherlands* (1989).

Wang, G. & Eltahir, E. (2000), 'Ecosystem dynamics and the Sahel drought', *Geophysical Research Letters* **27**(6), 795--798.

Wang, G.; Eltahir, E.; Foley, J.; Pollard, D. & Levis, S. (2004), 'Decadal variability of rainfall in the Sahel: results from the coupled GENESIS-IBIS atmosphere-biosphere model', *Climate Dynamics* **22**(6), 625--637.

Williams, JR.; Jones, CA. & Dyke, PT. (1984) 'A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [EPIC, Erosion-Productivity Impact Calculator, mathematical models]'. *Trans. ASAE* **27** (1984), pp. 129--144.

Winkel, T.; Renno, J. & Payne, W. (1997), 'Effect of the timing of water deficit on growth, phenology and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grown in Sahelian conditions', *Journal of Experimental Botany* **48**(5), 1001.

World Bank, 2007: Africa development indicators 2007. *Washington D.C., USA*.

Zaehle, S. & Friend, A. (2010), 'Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates', *Global Biogeochemical Cycles* **24**(1).

Zorita, E. & von Storch, H. (1999), 'The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods', *Journal of climate* **12**(8), 2474--2489.

ANNEXE: “The impact of future climate change on West African crop yields: what does the recent literature say?” in revision for Global Environmental Change

By Philippe Roudier, Benjamin Sultan, Philippe Quirion and Alexis Berg.

The impact of future climate change on West African crop yields: what does the recent literature say?

Philippe Roudier^{a,1}, Benjamin Sultan^b, Philippe Quirion^c, Alexis Berg^b

^a CIRED

45 bis av de la Belle-Gabrielle 94736 Nogent-sur-Marne

^b IRD – LOCEAN / IPSL

Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentation et Approche Numérique – UMR 7159 (CNRS/IRD/UPMC/MNH) – Université Pierre et Marie Curie, Case 100, 4 Place Jussieu 75252 Paris cedex 05, France.

^c, CIRED, CNRS, LMD-IPSL

¹ Corresponding author: roudier@centre-cired.fr. Tel: 0033143947367. Fax: 0033143947370

Acknowledgements

We would like to thank all authors of the papers selected in this review for their work and especially David Lobell for providing detailed results of his study. Moreover, we thank the PCMDI team for providing useful free-access data.

Abstract

In West Africa, agriculture, mainly rainfed, is a major economic sector and the one most vulnerable to climate change. A meta-database of future crop yields, built up from 16 recent studies, is used to provide an overall assessment of the potential impact of climate change on yields, and to analyse sources of uncertainty.

Despite a large dispersion of yield changes, the median is a yield loss near -11%. This negative impact, assessed by both empirical and process-based crop models, is larger in Sudano-Sahelian countries (-18% median response) than in Guinean countries (-13%). Negative impacts on crop productivity increase in severity as warming intensifies, with a median yield loss near -15% with most intense warming, highlighting the importance of global warming mitigation.

The consistently negative impact of climate change results mainly from the temperature rise. Rainfall changes, still uncertain in climate projections, have the potential to aggravate or mitigate this impact depending on whether rainfall decreases or increases. Finally, results highlight the pivotal role that the CO₂ fertilization effect may have on the sign and amplitude of change in crop yields. This effect is particularly strong for C3 crops and for a high CO₂ concentration scenario.

Keywords: West Africa, agriculture, climate change, forecast, crop model, yield

1. Introduction

The Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) has, with greater confidence than previous reports, warned the international community that the increase in anthropogenic greenhouse gases emissions will result in global climate change. Associated with the expected global temperature rise, precipitation patterns and quantities will likely change, and the frequency and intensity of major natural hazards, such as droughts, heat waves, floods and fires are expected to increase.

Although many uncertainties remain in the regional projections of these changes - particularly in the Tropics (Douville 2006) - local water resources, natural and agricultural ecosystems, and therefore human societies, are expected to be significantly impacted. These

impacts are likely to be particularly severe in developing countries, where poor communities are highly dependent on the direct use of local natural resources, and where widespread poverty limits the capacity to cope with climate variability and natural disasters (Commission of the European communities 2007). Among these regions, Africa is considered particularly vulnerable to climate change, due to a combination of naturally high levels of climate variability, high reliance on climate sensitive activities, such as rainfed agriculture, and limited economic and institutional capacity to cope with, and adapt to, climate variability and change. Furthermore, under its current climate Africa is already facing recurrent food crises and water scarcity which are exacerbated by rapid population growth: climate change will thus act as an additional stress in the future of African economies and livelihood (CGIAR 2009).

Agriculture is certainly the most vulnerable sector in Sub-Saharan Africa (SSA). Crop yields are highly dependent on climate fluctuations, as agriculture is mostly rainfed (96% of all agricultural land, World Bank 2008). Moreover, crop management (use of fertilizers and pesticides combined with modern cultivars) remains low (Dingkuhn *et al.* 2006). Adverse changes in climate are thus likely to directly impact agricultural systems, thereby threatening food security and economic growth. Indeed in 2000, approximately 80% of all cereals consumed in SSA were supplied by domestic production and, in recent years, agriculture's share in SSA's GDP has varied between 15 and 20% (World Bank 2008). It is, therefore, crucial to diagnose the potential implications of climate change on crop productivity in the coming decades. However, producing reliable future agricultural production scenarios remains challenging because of large uncertainties in regional climate change projections, in the response of crops to environmental change (rainfall, temperature, CO₂ concentration), in the coupling between climate models and crop productivity functions, and in the adaptation of agricultural systems to progressive climate change (Challinor *et al.* 2007). These uncertainties result in diverging estimations of productivity response to climate change in SSA in the recent literature. Thus there is clearly a need for a comprehensive overview of climate change impacts on agriculture in the different regions of Africa.

The objective of this study is to provide such an overview for West Africa, based upon the recent scientific literature (ECOWAS countries + Cameroon). This region, particularly vulnerable to climate variability and changes, concentrates a significant part of SSA's population and croplands: 43% of the population¹, around 53% of the area of cereals, roots

¹ http://www.oecd.org/document/19/0,3343,en_38233741_38246806_38283987_1_1_1_1,00.html

and tuber crops (FAOSTAT). Rainfall in this region depends on the West African monsoon (WAM), which takes place during the boreal summer as a result of differential warming over the ocean (the Gulf of Guinea) and the land surface. The WAM exhibits considerable variability on interannual and interdecadal timescales: the long-term and large-scale drought of the 70's and 80's (e.g., Dai *et al.* 2004) stands as the greatest regional climatic signal over the second half of the last century in terms of precipitation (Trenberth *et al.* 2007). Naturally, such variability has had dire consequences for local populations - highlighting their vulnerability to potential adverse future changes of the WAM in the context of global climate change. Furthermore, there are few consensuses regarding the evolution of monsoon rainfall in a warmer climate: some studies make projections of wetter conditions and some predict more frequent droughts (Druyan 2010). To our knowledge, only two recent studies (Biasutti & Sobel 2009; Patricola & Cook 2010) found a robust agreement across the various climate models of the IPCC CMIP3 ensemble on the seasonal distribution of Sahel rainfall changes (with a drying of the early season and positive rainfall anomaly at the end) in contrast with a large uncertainty for summertime rainfall totals.

This study aims to beyond a simple static review of the literature: we build a meta-database of future yield change by compiling results from 16 published papers dealing with climate change impacts on agriculture in West Africa. From this database, we are therefore able to provide a quantitative assessment of the range of projected impacts and an analysis of the sources of uncertainty. Given the range of regions, crops and methodologies encompassed by the different studies, such a meta-analysis is bound to remain imperfect. However it is a necessary first step to identify the main causes of uncertainty in agricultural future projections in the region, and a fundamental prerequisite to produce reliable assessments (Challinor *et al.* 2009).

2. Materials and methods

2.1 The general workflow

An examination of the literature on climate change impacts on agriculture in Africa, and elsewhere in the world, reveals a typical workflow summarized in the flowchart of Fig. 1. Quantifying the response of crop yields to climate change requires the following main steps.

2.1.1 *Generation of future climate*

To assess the impact of climate change on crop production within a given study domain, it is necessary to define scenarios describing the future evolution of meteorological variables. The simplest way is to define a uniform scenario (for instance +10% in rainfall, +2.5°C in temperature) and to add these changes to the observed climate data of a present time period. Among the studies reviewed in the present analysis, a few follow that approach: Ben Mohamed *et al.* 2002, Salack 2006, Vanduivenbooden *et al.* 2002. However, it is obvious that such a method, although allowing useful sensitivity studies, relies on assumptions about future climate: it has no real physical basis, and does not preserve consistency among climate variables. A more physics-based approach is the use of global climate models (GCMs) that are able to generate physically consistent sets of climate variables over the study domain. These models are forced by scenarios of future radiative forcing, e.g. increasing greenhouse-gas (GHG) concentrations. Several emissions scenarios, describing different future socio-economic evolutions, have been defined by the IPCC, and for a given scenario different GCMs can provide different climate projections over the study area. Therefore, in order to span some of the uncertainty in climate projections, the majority of the published papers use several GCMs and/or scenarios; see for instance Schlenker & Lobell (2010) in this review.

2.1.2 *Crop modelling*

To translate climate scenarios into possible agricultural outputs, two distinct approaches are usually adopted: statistical modelling and process-based crop modelling, both of which aim at estimating crop productivity as a response to climate.

Empirical crop models are statistical relationships derived from observations, linking crop yields in a given location to local climate variables. Although such relationships are relatively easy to compute, calibrating and validating a robust statistical model requires long

series of data (yields and climate). One advantage is that such relationships can be established directly at large scale (e.g., national) using spatially aggregated climate variables to predict average yields over large areas. In this review, Lobell et al. 2008 and Schlenker & Lobell 2010 in particular, follow this approach, arguing that it provides a straightforward assessment of future climate impacts at a scale directly relevant to informing policymakers and stakeholders.,

The other approach is process-based crop modelling. These models represent the physiological processes of crop growth (assimilation of carbon and nutrients, transpiration) and development (e.g. apparition of successive organs, vegetative and reproductive phases) as a response to climate, thus simulating the seasonal crop cycle and its different parts. Not all models, however, have the same physiological approach, nor go into the same level of detail. In particular, the positive effect of higher atmospheric CO₂ concentrations on crop photosynthesis (Tubiello et al. 2007b) is not taken into account in all crop models (for example, Salack 2006). In addition, these models usually require numerous parameters and are thus applied at the plot scale where these data are available and can be considered homogeneous: they do not directly provide information on climate impacts at larger scale.

Note that a third approach, the Ricardian analysis (Mendelsohn et al. 1994), is also used for estimating the impact of climate change on agriculture in West Africa (e.g. Kurukulasuriya & Mendelsohn 2007; Molua 2009). This approach focuses on the net income of farming systems instead of focusing on crop yields and, unlike most impact studies, takes adaptation strategies (cropping system management) into account.

2.1.3 Linking GCMs and crop models

Combining GCM and crop models raises several issues. First, GCM most often show significant biases in their simulated climate: regional amounts and patterns of precipitation, in particular, may not be realistic (Randall et al. 2007). Hence, geographically explicit climate impact studies generally require some level of climate data bias correction. The simplest correction method is the “anomaly method”: for a given GCM, a computed mean annual anomaly between future and current simulated climates is added to a current, observation-based, climate dataset. In the present review, Muller et al. 2010 for instance, adopt this approach.

Second, combining GCM and mechanistic crop models is more complex than a simple coupling of the two models due to scale mismatch. Indeed, GCMs typically produce climate projections at a spatial resolution in the order of 2°. While statistical crop models can be

directly calibrated to use such aggregated information as input (see previous section), process-based crop models, being designed to work at plot scale, need climate data at a finer spatial scale. Thus, there is, in general, a need to downscale the climate information from the GCM to the crop model scale. Temporal downscaling may also be required when the outputs of the GCM are only available at monthly intervals, for example, for some IPCC AR4 simulations archived by the Program for Climate Model Diagnosis and Inter-comparison, PCMDI (see http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/data_status_tables.htm). There are two general types of downscaling methods (that can be sometimes combined):

- Statistical downscaling, in which empirical relationships between atmospheric meso-scale circulation and local climate are used to retrieve realistic time series of local climate variables. This method includes stochastic weather generators, linear or non-linear regressions, weather-type methods (Zorita & Von Storch 1999). Muller et al. (2010), for instance, use a stochastic weather generator to downscale monthly climate variables to an hourly (??) time step.
- Dynamical downscaling, which uses regional climate models with a fine (approximately 10 to 50 km) resolution nested in the GCM (Paeth et al. 2010). It has to be noted, however, that in the impact studies reviewed here, the type of downscaling method – if any – is not systematically reported or clearly detailed.

In recent years, the growing need for climate change-oriented crop modelling applications has led to the development of large-scale crop modelling. Such models are designed and calibrated to work directly at a scale compatible with climate model outputs, suppressing the need for downscaling/upscaling. Some models are developed independently as climate impact models (Challinor et al. 2004, Tao et al. 2009), others are developed as part of Earth System vegetation models in which they account for croplands (de Noblet-Ducoudré et al. 2004; Bondeau et al. 2007; Berg et al. 2010); they may then be used for climate impact studies. In the present review, Muller et al. (2010) use such a model, LPJ-ml (Bondeau et al. 2007).

2.1.4 Adaptation to climate change

When assessing the impact of climate change on yields it is important to know if the studies take adaptation into account. According to Chuku & Okoye (2009), the adaptation options available in agriculture to cope with climate change can be classified as (i) income/asset management, (ii) government programs and insurance, (iii) farm production

practices and (iv) technological development. These authors also underline that these categories are characterized by the scale and the agents involved. Several adaptation options are already used at the local scale by Sahelian farmers. They are generally farm production practices (eg. water management, selection of crop landraces, fertilization) but also income/asset management (eg. diversification of activities, migrations). This shows that adaptation is a fundamental issue in assessing future crop yield scenarios if one wants to avoid an overestimation of climate change impacts.

However, in most of the papers selected in this review, adaptation is not explicitly taken into account. In some studies (e.g. Müller et al, 2010) the sowing date changes every year but is still based on the same general cropping practice (eg sowing at the first big rain) so this behavior is an existing adaptation to the inter-annual variability of climate rather than to climate change. Tingem & Rivington (2009) simulate the yield change with and without adaptation. They consider new sowing dates and hypothetical improved cultivars. Future yield losses are clearly limited by these adaptation options. Butt et al (2005a) present their results, both without adaptation, and with a set of theoretical adaptation options: crop mix, heat resistant varieties and economic. All of them definitely improve future potential yields. Note that for these 2 studies, we only include values without the adaptation options in the database because, (i) some of these options are hypothetical and (ii) we try to focus more on the raw impact of climate. Finally, the Ricardian studies consider full adaptation. However, it is not possible in the results to detail what options are used and the impact of climate change without adaptation. Moreover this method assumes out the costs of the transition from one climate to another, hence it over-estimates the benefits of adaptation.

Globally, the selected assessments assume out many adaptation practices that could be used in the future and focus more on the "gross" impact of climate on yields.

2.2 The meta-database

Our literature survey covers major publications on the impact of climate change on crop yields in West Africa. Only studies where the relative yield change between the present and the future was reported as numerical or graphical data, or was available by personal communications, were included. The Ricardian analyses were not considered since they only deal with the net output/income value, and future yields are not available. Results from Ricardian studies are therefore presented separately in section 3.6. It should be noted that the reference time period can vary slightly from one paper to another (1961-1990 for Tingem &

Rivington 2009 and 1960-2002 from Schlenker & Lobell 2010, for example): this non-negligible impact on results is presented as variations. Overall we used 16 papers to build the meta-database (Tab.1). We extracted the relative yield change for each area and each scenario (sometimes several scenarios, countries and/or several crops per study). We also tried to avoid an over-representation of any individual study. More precisely, we randomly deleted half of the values from Schlenker & Lobell (2010), initially representing one third of the meta-database. Finally, we retained 347 values of relative yield change from the 16 studies. The contribution of each study to the meta-database is given in Fig. 2.

We were specifically interested in finding generic explicative variables that might influence the magnitude and/or sign of the response of the yield to climate change. We therefore selected and categorized 5 variables:

- *The CO₂ fertilization effect*: We defined two categories depending on whether the fertilization effect is taken into account in the yield projection. The category taking account of the CO₂ effect regroups 157 of 347 points, whilst neglecting the CO₂ effect regroups 190 values.
- *The intensity of the warming scenario*: We deducted the radiative forcing from the SRES scenario and the time horizon according to the table published by the IPCC (http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/551.htm). It should be noted that this variable can be found only for studies considering the SRES scenarios (10 of 16 studies and 221 points of 347). We then defined two categories according to the median value which divides the sorted data set into two equal parts so that each part represents half of the sampled population. The median value of the radiative forcing is 3.9 W/m² which corresponds roughly to an increase of 3°C in the global temperature.
- *The yield modelling category*: Two categories are defined according to the general workflow presented in section 2.1: statistical crop modelling studies (149 points of 347) and process-based crop modelling studies (198 points of 347).
- *The crop type*: The selected papers generally consider food crops (mainly maize, millet and sorghum; Fig. 2). Since very few authors (Smith et al. 1996; Salack 2006) give details of the cultivars used, only the name of the crop type is retained in the meta-database. Some papers give results by grouping several crop types (“major crops” for Muller et al. 2010; “cereals” for Fischer et al. 2005) and are categorized together as “global” in the meta-database.

- *The area:* Some of these studies present results aggregated at the continent (Sub-Saharan Africa; SSA) or sub-continent scale (West Africa; WA) and some others consider a specific country (Fig. 2). We divided the latter into two categories according to the climatic gradient: the Sudano-Sahelian area regrouping Niger, Mali, Burkina Faso, Senegal and Gambia (126 points of 347) and the Guinean area regrouping Benin, Togo, Nigeria, Ghana, Liberia, Sierra Leone, Cameroon, Guinea, Guinea Bissau, Ivory Coast (101 points of 347).

Other descriptive variables are available in the meta-database (Table 1): the name of the climate model used for future projections, the time period for the present climate, the time horizon for future scenarios, the name of the process-based crop model used for projections.

2.3 The meta-analysis methodology

Quantifying the impact of climate change on agricultural yields requires a methodology with nested components (described in section 2.1) where the choice of any individual component (for instance the choice of the climate model and/or the crop model) and the way they are coupled together (for instance the choice of the downscaling technique) can strongly influence the results. We use the meta-database combining results from 16 published papers to sample the structural uncertainty of the response of the yield to climate change in Africa. Histograms of relative yield change between present and future is one way to visually assess the most frequent changes and the dispersion of responses within the literature. These histograms of yield change can be drawn for the whole dataset but also for sub-samples based on the categorical explicative variables defined in section 2.2. The differences between the yield change distributions of sub-samples, defined on the basis of an explicative variable, can illustrate the influence of the latter variable on the sign, magnitude and uncertainty of the projected yield change. It should be noted that since the meta-database includes heterogeneous results coming from various publications with very different methodologies, regions and crops, we will limit our meta-analysis to a visual comparison of the results through histograms and illustrate the main differences between studies. Indeed, as mentioned by Challinor *et al.* (2007), the estimation of uncertainty from a sample of several impact studies is not precise enough to provide a full quantitative assessment.

3. Results

Fig. 3 shows the distribution of relative yield variation under climate change for all simulations (all database, full line) and for simulations assuming no CO₂ fertilization effect (dashed line). The former aims at giving a global snapshot of all the values in the literature while the latter plot focuses on climate impacts only. It reveals a large spectrum of response for both distributions even though, globally, they depict a negative pattern: the median values are -11% without the CO₂ fertilization effect and -5% with it. In order to focus more precisely on the impacts of climate, we next consider only the yields change without the CO₂ fertilization effect (190/357 points). It should be noted that all the figures described in section 3 have also been plotted using the whole database. The comparison reveals the same global tendency. The CO₂ fertilization effect will be considered separately in section 3.6.

3.1 Process based vs. statistical crop modeling

We divide the meta-database without a CO₂ fertilization effect into two sub-groups: studies using process-based crop models and statistical models. The distribution (Fig. 4) medians are quite close (-13% for process based models vs -11%). It means that, although completely different in nature, the two methodologies give similar results for future yields. However, results from process based crop modelling studies show a larger dispersion in the yield response with yield anomalies of greater amplitude. Indeed such methods are able to capture complex non-linear yield responses resulting from multiple interactive factors (CO₂ effect, rainfall distribution changes, extreme temperature effects...) while statistical methods are much more constrained.

3.2 Effect of the magnitude of radiative forcing

Here the database is divided into two categories according to radiative forcing, an indicator which synthesizes the warming impact of anthropogenic greenhouse gases and aerosols. For a given climate model, radiative forcing determines the average temperature but the latter also depends on the model's climate sensitivity. Splitting the database according to

radiative forcing provides an indication of the benefits of climate change mitigation. Indeed because of climate system inertia, a significant warming is unavoidable, and emission reductions can only mitigate this warming. Thus, the benefits of such reductions are better assessed by comparing the impacts of a moderate warming to that of a much greater warming, than by comparing a no-warming scenario (which is already out-of-reach) to a warming scenario. Fig. 5 shows that the yield response is quite different for the two radiative forcing categories. The impact of climate change on yield is clearly more negative for the higher one (median = -15% vs. -6%). The range of values is also larger for the high radiative forcing category.

3.3 Effect of temperature and rainfall changes

Rainfall and temperature changes are major determinants of recently observed trends in agricultural production in Sub-Saharan Africa. Both past temperature increase and rainfall decrease have led to a production shortage since the 1970s (Barrios et al. 2008). If the effects of rainfall change overtake that of recent temperature change (Barrios et al 2008), it might be quite different in future projections. Indeed, Schlenker and Lobell (2010) show that temperature increases projected by climate models are much larger relative to precipitation changes, with the latter typically smaller than the historical standard deviation. Furthermore, they found that the marginal impact of one standard deviation change in precipitation is smaller than that of one standard deviation change in temperature.

Based on the results from Schlenker and Lobell (2010), Fig. 6 attempts to assess the respective impact of temperature and rainfall change on future yield change. Even if rainfall remains constant, the yield decreases by about 15%, probably due to the effect of higher temperature reducing the crop growth cycle length and increasing water stress through higher evaporation. However, rainfall change does have an impact, even if it is lower than that due to a temperature change. Fig. 6 shows that the median yield changes when rainfall increases or decreases differs by a factor of two, -10% and -21 %, respectively. This is consistent with results shown by Salack (2006) for a variety of millet: in this study, rainfall increase did not totally compensate for the effect of temperature increase (+1.5°C) but greatly mitigated the impacts of warming (-59% and -26% for decreasing and increasing rainfall, respectively). However, assessing the respective roles of temperature and rainfall change on crop yield change is difficult since those two variables are closely linked, as shown by Douville (2006) who demonstrates the effect of precipitation on surface temperature in the Sahel. Furthermore,

effects of temperatures and rainfall changes can interplay. For instance, for crops, the combination of high temperatures and abundant rainfall fosters high rates of chemical weathering and leaches clay soils of low inherent fertility (Barrios et al. 2008).

3.4 Differences between the Sudano-Sahelian and Guinean areas

The impact of climate change on West African yields differs between the south (the Guinean zone) and the north (the Sudano-Sahelian zone). Fig. 7 shows the distribution of the relative yield change for countries belonging to the Guinean zone (dashed line) and to the Sudano-Sahelian zone (full line): more negative for the Sudano-Sahelian countries (median= -18%) than for the Guinean ones (median=-13%). This difference can be explained by the projections of future climate in Africa (see the maps from the IPCC AR4; 2007) which show a greater warming over continental Africa (particularly in Sahel and Sahara) while the temperatures of the Guinean zone, which are influenced by the ocean, are expected to increase more slowly. Moreover, an increase in temperature has a significant impact on water balance that is more detrimental in the Sudano-Sahelian zone, where water is often a limiting factor, than in the Guinean zone where it is not.

3.5 Differences among cultivars

Most of the selected studies focus on one or more varieties without specifying which cultivar is used. However, in reality, farmers are able to select adapted varieties (e.g. late or early millet) or to adapt their practices (e.g. delayed or early sowing), with significant consequences on yields. For instance, Smith (1996) and Salack (2006) show that future yields of millet differ strongly according to the variety (-44% to -29% for early millet and -21% to -14% for late millet). Thus, it seems very important for future studies to take into account different cultivars, or at least to carefully define the ones used in order to allow comparisons between results.

3.6 CO₂ fertilization effect

Rising concentrations of CO₂ in the atmosphere are driving global warming that will impact on crop yields through changes in rainfall and increases in temperature. However, elevated CO₂ also has beneficial physiological effects on crops through the stimulation of

photosynthesis and reduction of drought stress as a result of lower stomatal conductance and greater intercellular CO₂ (Tubiello et al. 2007b; Leakey 2009). By conducting a systematic comparison between yield response to climate change with, or without, CO₂ fertilization effect, Muller et al. (2010) conclude that the largest uncertainty in the quantification of agricultural impacts is the effect of CO₂. They found a yield increase of 8% in African scenarios (percent change in 2046-2055 relative to 1996-2005) with full CO₂ fertilization, and a yield loss of -8% without the CO₂ effect. Similar results are found by Muller et al. (2010) at the global scale where the CO₂ fertilization effect determines the sign of future yield changes. However, other studies show lower differences between full and no CO₂ fertilization scenarios. Finally, the effect seems to be less important when considering short and mid-term horizons, moderate CO₂ emission scenarios and C4 crops. For instance, Parry et al. (2004) do not find a strong difference in 2020 between CO₂ fertilization and no CO₂ fertilization projections, whereas the difference is much stronger in 2080.

In this section, we quantitatively study the CO₂ fertilization effect, focusing only on studies that provide results with and without this effect. Fig. 8 shows that the difference between both hypotheses depends strongly on the parameters (e.g. type of crops, time horizon, emission scenario) considered. The difference is particularly high for C3 crops (e.g. soybean, groundnut) and for situations with high CO₂ concentrations: typically, at the end of the century and for SRES A scenarios. Moreover, in some cases the CO₂ fertilization effect may compensate the yield loss due to climatic parameters, and sometimes reverse it: this happens in 6 cases (see Fig. 8). Note that the point with no difference between no and full CO₂ fertilization comes from Parry et al. (2004) who use color scales for their results. This means that both points are in the same category ([-30%; -10%]) .

3.7 Results on monetary variables

Another way to analyze the impact of climate change on agriculture is to look for a statistical correlation, not between climate and agricultural physical production or yields, but between local climate (generally approximated by seasonal rainfall and temperature) and monetary variables like the value of production, farm income or agricultural land. This is the basis of the so-called “Ricardian” approach introduced by Mendelsohn et al. (1994) for the US, and since then applied to Africa, eg. by Ajetomobi et al. (2010), Hassan (2010), Kurukulasuriya & Mendelsohn (2008, 2007), Molua (2009) and Nhemachena et al. (2010). In

addition, Seo *et al.* (2009) recently studied the impact on agricultural revenue by combining the agro-ecological zones (AEZ) method and the Ricardian approach.

As mentioned before, we comment on the results from this approach in the present section rather than combining them with the rest of the database, since the latter results concern physical yields, not monetary variables. Moreover, in some studies, the results are not workable: they may cover Africa as a whole, or it may not be possible to compute a relative variation. The range of values in the Ricardian analysis is very important, even within a single study. For instance, according to Kurukulasuriya & Mendelsohn (2007), in 2100, income variation in Africa ranges from -34% to +66%, depending on the GCM. For Cameroon in 2100, Molua (2009) finds a large range of values, from -50% to +37.5%, depending on the GCM used (with SRES B2 scenario). Similar contrasted results are also found in Hassan (2010) and Seo *et al.* (2009). This dispersion may be due to differences in GCMs projections and also to the sensitivity of the Ricardian analysis to rainfall. Indeed, Ajetomobi *et al.* (2010) show with rice in Nigeria, that a 5% decrease in rainfall leads to a 65.35% decrease in income on non-irrigated farms, although +2°C leads only to -11.7%.

Because of this wide range of values, it is not yet possible to reach a conclusion on future trends from these Ricardian studies.

4. Conclusions

Quantifying the impacts of climate change on agriculture is a challenging task because of large uncertainties in regional climate change projections, in the response of crop to environmental changes (rainfall, temperature, CO₂ concentration), in the coupling between climate models and crop productivity functions, and in the adaptation of agricultural systems to progressive climate change.

Quantifying such impacts requires a nested methodology where basic assumptions (for instance, the choice of the climate model and/or the crop model) can strongly influence the sign and magnitude of yield response. So, to extract a robust signal of climate change impact, it is necessary to sample several methods and scenarios. By combining results from 16 published papers, this study gives an overview of the sign, amplitude and uncertainty of impacts on crop productivity in West Africa. In spite of a large dispersion of future yield changes, ranging from a yield loss of -50% to a yield increase of +90%, the median value

gives a negative yield loss near -11%. This negative impact seems robust since it is found from both empirical and process-based crop models, although the uncertainty is far larger for process-based studies. Dry cereals cultivated in Sudano-Sahelian countries will be more affected by climate change (median=-18%) than those cultivated in Guinean countries (median=-13%). We found that the negative impacts of climate change on crop productivity are more severe with more intense warming scenarios, with a median yield loss near -15% for the most intense warming scenarios. This relationship between warming intensity and climate impacts highlights the positive effect of climate change mitigation: mitigating global warming will result in less severe impacts.

The consistent negative impact of climate change on crop yield emerging from the 16 studies database results partly from a temperature rise that reduces the crop cycle duration and creates higher water stress through higher evapotranspiration demand. Rainfall changes have the potential to aggravate or mitigate this negative impact, whether rainfall decreases or increases in the future. However, despite the importance of rainfall on crop yield in traditional rainfed systems in Africa, future scenarios of WAM changes are divergent among the IPCC climate models. Thus, producing reliable future scenarios of agricultural productivity depends critically on the ability of the climate modelling community to reduce the uncertainties in climate change projections (rainfall and temperature).

Our meta-analysis highlights the pivotal role that the CO₂ fertilization effect has on the sign and amplitude of changes in crop yield response to climate change. While the impact of climate change on crop yield is essentially negative without considering the fertilization effect of CO₂, future yields scenarios accounting for this effect are more optimistic. However the CO₂ effect is difficult to estimate accurately and to parameterize in crop models (Long *et al.* 2006; Tubiello *et al.* 2007a; Ainsworth *et al.* 2008b). Muller *et al.* (2010) and the recent review of Leakey (2009) consider that CO₂-induced yield increase is likely to be overly optimistic in current projections of future crop yields. It is particularly true for C4 plants (mainly sorghum, maize, millet in Africa) whose photosynthesis does not seem to be stimulated directly by elevated CO₂ (Ghannoum *et al.* 2000; Leakey 2009). Moreover, the quality of agricultural products is likely to decrease under increased CO₂ fertilization with the decrease of the protein content (Taub *et al.* 2008) and an increase susceptibility to insect pests (e.g. Dermody *et al.* 2008; Zavala *et al.* 2008). It is, therefore, crucial to improve our knowledge of the effect of CO₂ on C4 crops in order to achieve better reliability in future crop yields in West Africa.

Another type of study, Ricardian studies, assumes full adaptation and focuses on the value of farmland or farm income (and not on yields): that is why we present their results separately. Moreover, the selected Ricardian studies sometimes give results for Africa as a whole. These papers show a large dispersion of expected impacts, even within one study. That is why it is not yet possible to use these studies to reach a conclusion on future trends.

Finally, as mentioned by Challinor *et al.* (2007), direct comparison among studies dealing with climate change and agricultural impacts is a difficult task. These studies encompass a range of different countries, scales and crops, and uncertainty can come from various sources (climate models and scenarios, crop models, downscaling). Hence combining yield impact studies is a first step in the estimation of sign, magnitude and uncertainty of climate change impacts, but is not sufficiently precise. The multi-ensembles approach, with varying climate models, emissions scenarios, crop models (including different set of parameterizations for crucial processes), and downscaling techniques, as recommended by Challinor *et al.* (2007), would enable a move towards a more complete sampling of uncertainty in crop yield projections. Among those parameters, it may be particularly interesting to focus on differences between crop models and between downscaling methods. Indeed, the uncertainty created by these parameters has rarely been studied although, for hydrological impacts, Mall *et al.* (2008) show, for India, substantial differences between dynamical crop models, and Ducharne *et al.* (2009) important differences between downscaling methods. Conducting such a multi-ensembles approach for assessing the impacts of climate change on agriculture in Africa is particularly relevant in the framework of the coming IPCC exercise.

References

- Adejuwon, J.O. (2006) Food crop production in Nigeria. II. Potential effects of climate change. *Climate Research* 32, 229-245.
- Ajetomobi, J.O., Abiodun, A., Hassan, R. (2010) Economic impact of climate change on rice agriculture in Nigeria. Joint 3rd African Association of Agricultural Economists (AAAE) and

48th Agricultural Economists Association of South Africa (AEASA) Conference, Cape Town, South Africa, September 19-23, 2010.

Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., Ort, D.R., Long, S.P. (2008) FACE-ing the facts: Inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply *New Phytologist* 179, 5-9.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Working Paper 56

Barrios, S., Ouattara, B., Strobl, E. (2008) The impact of climatic change on agricultural production: Is it different for Africa? *Food Policy* 33, 287-298.

Ben Mohamed, A., Vanduivenbooden, N., Abdousallam, S. (2002) Impact of climate change on agricultural production in the Sahel - Part1. methodological approach and case study for millet in Niger. *Climatic Change* 54, 327-348.

Berg, A., Sultan, B., de Noblet, N. (2010) Including Tropical Croplands in a Terrestrial Biosphere Model: Application to West Africa. *Climatic Change* in press.

Bezançon, G., Pham, J.-L., Deu, M., Vigouroux, Y., Sagnard, F., Mariac, C., Kapran, I., Mamadou, A., Gérard, B., Ndjeunga, J., Chantereau, J. (2009) Changes in the diversity and geographic distribution of cultivated millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties in Niger between 1976 and 2003. *Genetic Resources and Crop Evolution* 56, 223-236.

Biasutti, M., and A. H. Sobel (2009), Delayed Sahel rainfall and global seasonal cycle in a warmer climate, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23707, doi:10.1029/2009GL041303.

Bondeau, A., Smith, P., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B. (2007) Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* 13, 679-706.

Butt, T., McCarl, B., Angerer, J., Dyke, P., Stuth, J. (2005a) The economic and food security

implications of climate change in Mali. *Climatic Change* 68, 355-378.

Butt, T.A., McCarl, B.A. (2005b) An analytical framework for making long -term projections of undernourishment: A case study for agriculture in Mali. *Food Policy* 30, 434-451.

CGIAR – Consultative Group on International Agricultural Research (2009) *Climate, agriculture and food security: A strategy for change*. CGIAR, p. 56.

Challinor, A., Wheeler, T., Garforth, C., Craufurd, P., Kassam, A. (2007) Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. *Climatic Change* 83, 381-399.

Challinor, A.J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E., Fraser, E. (2009) Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. *Journal of Experimental Botany* 60, 2775–2789.

Challinor, A.J., T.R., W., Slingo, J.M., Craufurd, P.Q., Grimes, D.I.F. (2004) Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 99–120

Chuku, C.A., Okoye, C. (2009). Increasing resilience reducing vulnerability in sub-Saharan African agriculture: Strategies for risk coping and management. *African Journal of Agricultural Research* 4. 1524-1535.

Cline, W.R. (2007) *Global warming and agriculture. Impact estimates by country*. Center for Global Development and Peterson Institute for International Economics
Washington DC, USA.

Commission of the european communities (2007) *Adapting to climate change in Europe – options for EU action*, Brussels, Belgium.

Cook, K., Vizzy, E. (2006) Coupled Model Simulations of the West African Monsoon System: Twentieth- and Twenty-First-Century Simulations. *Journal of Climate* 19, 3681-3703.

Dai, A., Lamb, P.J., Trenberth, K.E., Hulme, M., Jones, P.D., Xie, P. (2004) The recent Sahel

drought is real. *International Journal of Climatology* 24, 1323–1331.

De Noblet-Ducoudré, N., Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B., Perrier, A. (2004) Coupling the soil-vegetation-atmosphere-transfer scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie* 24, 397-407.

Dermody, O., O'Neill, B.F., Zangerl, A.R., Berenbaum, M.R., DeLucia, E.H. (2008) Effects of elevated CO₂ and O₃ on leaf damage and insect abundance in a soybean agroecosystem. *Arthropod-Plant Interactions* 2, 125-135.

Dingkuhn, M., Singh, B.B., Clerget, B., Chantreau, J., Sultan, B. (2006) Past, present and future criteria to breed crops for water-limited environments in West Africa. *Agricultural Water Management* 80, 241-261.

Douville, H., Salas-Mélia, D., Tyteca, S. (2006) On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming. *Climate Dynamics* 26, 367–385.

Douville, H. (2008) Detection-attribution of global warming at the regional scale: How to deal with precipitation variability? *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02701, doi:10.1029/2005GL024967.

Druyan, L.M. (2010) Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology* online.

Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., Rieu, J. (2009) Projet RExHySS: Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer., Paris, France.

Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F.N., van Velhuizen, H. (2005) Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360, 2067-2083.

Ghannoum, O., von Caemmerer, S., Ziska, L.H., Conroy, J.P. (2000) The growth response of C4 plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment Plant, Cell and Environment 23, 931-942.

Hansen, J.W., Jones, J.W. (2000) Scaling-up crop models for climate variability applications. Agricultural Systems 65, 43-72.

Hassan, R.M. (2010) Implications of Climate Change for Agricultural Sector Performance in Africa: Policy Challenges and Research Agenda. Journal Of African Economies 19, ii77–ii105

Hellmuth M, Moorhead A, Thomson M, Williams J. (2007). Gestion du risque climatique en Afrique : ce que la pratique nous enseigne. Institut National de Recherche pour le climat et la société (IRI) New York, USA.

IPCC - International Panel on Climate Change, (2007) Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, p. 104.

Jones, P.G., Thornton, P.K. (2003) The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. Global Environmental Change 13, 51-59.

Kurukulasuriya, P., Mendelsohn, R. (2007) A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on African Cropland. Policy research Working Paper 4305.

Kurukulasuriya, P., Mendelsohn, R. (2008) A Ricardian analysis of the impact of climate change on African cropland. AfJARE 2 (1), 1-23

Leakey, A.D.B. (2009) Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. Proc. R. Soc. B 276, 2333–2343.

Liu, J., Fritz, S., van Wesenbeeck, C.F.A., Fuchs, M., You, L., Obersteiner, M., Yang, H. (2008) A spatially explicit assessment of current and future hotspots of hunger in Sub-Saharan Africa in the context of global change. Global and Planetary Change 64, 222-235.

Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R.L. (2008) Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science* 319, 607-610.

Long, S.P., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., Morgan, P.B. (2006) Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science* 312, 1918-1921.

Mall, R., Singh, R., Gupta, A., Srinivasan, G., Rathore, L. (2007) Impact of climate change on Indian agriculture: a review. *Climatic Change* 82, 225-231.

Mendelsohn, R., Nordhaus, W.D., Shaw, D. (1994) The impact of global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *American Economic Review* 84, 753-771.

Molua, E.L. (2009) An empirical assessment of the impact of climate change on smallholder agriculture in Cameroon. *Global and Planetary Change* 67, 205-208.

Müller, C., Bondeau, A., Popp, A., Waha, K., Fader, M. (2010) Climate change impacts on agricultural yields. Background note to the World Development Report 2010. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.

Nelson, G.C., Rosegrant, M., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Msangi, S., Ringler, C., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Lee, D. (2009) Climate Change: Impact on agriculture and costs of adaptation. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C.

Nhemachena, C., Hassan, R., Kurukulasuriya, P. (2010) Measuring the economic impact of climate change on African agricultural production systems. *Climate Change Economics* 1(1), 33-55.

Paeth, H., Capo-Chichi, A., Endlicher, W. (2008) Climate Change and food security in tropical West Africa - a dynamic-statistical modelling approach. *Erdkunde* 62, 101-115.

Paeth, H., Hall, N.M.J., Gaertner, M.A., Dominguez Alonso, M., Moumouni, S., Polcher, J.,

Ruti, P.M., Fink, A.H., Gosset, M., Lebel, T., Gaye, A.T., Rowell, D.P., Moufouma-Okia, W., Jacob, D., Rockel, B., Giorgi, F., Rummukainen, M. (2010) Progress in regional downscaling of West African precipitation. *Atmospheric Science Letters* in press.

Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., G., F. (2004) Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14, 53–67.

Patricola, C.M. and K.H. Cook (2010) Northern African climate at the end of the twenty-first century: an integrated application of regional and global climate models, *Climate Dynamics*, 35, 193-212.

Randall, D.A., Wood, R.A., Bony, S., Colman, R., Fichefet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R.J., Sumi, A., Taylor, K.E., (2007) Climate models and their evaluation, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge Univ. Press., Cambridge, U.K.

Salack, S. (2006) Impacts des changements climatiques sur la production du mil et du sorgho dans les sites pilotes du plateau central, de Tahoua et de Fakara. CILSS, Niamey, Niger.

Schlenker, W., Lobell, D.B. (2010) Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters* 5, 1-8.

Seo, S.N., Mendelsohn, R., Dinar, A., Hassan, R., Kurukulasuriya, P. (2009) A Ricardian Analysis of the Distribution of Climate Change Impacts on Agriculture across Agro-Ecological Zones in Africa. *Environ. Resource. Econ.* 43, 313–332

Smith, J.B., Huq, S., Lenhart, S., Mata, L.J., Nemesova, I., Toure, S. (1996) *Vulnerability and Adaptation to Climate Change: Interim Results from the U.S. Country Studies Program*. Kluwer Academic Publishers.

Tao, F., Zhang, Z., Liu, J., Yokozawa, M. (2009) Modelling the impacts of weather and

climate variability on crop productivity over a large area: A new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1266-1278.

Taub, D., Miller, B., Allen, H. (2008) Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Global Change Biology* 14, 565–575.

Tingem, M., Rivington, M. (2009) Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14, 153-168.

Trenberth, K. (2010) More knowledge, less certainty. *Nature Reports Climate Change* online, 20-21.

Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M.B.S., Zhai, P., (2007) Observations: surface and atmospheric climate change, in: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, HL, M. (Eds.), *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 235-336.

Tubiello, F.N., Amthor, J.S., Boote, K.J., Donatelli, M., Easterling, W., Fischer, G., Gifford, R.M., Howden, M., Reilly, J., Rosenzweig, C. (2007a) Crop response to elevated CO₂ and world food supply: A comment on "Food for Thought..." by Long et al., *Science* 312:1918-1921, 2006. *European Journal of Agronomy* 26, 215-223.

Tubiello, F.N., Soussana, J.F., Howden, M. (2007b) Crop and pasture response to climate change. *PNAS* 104, 19686-19690.

Vanduivenbooden, N., Abdousallam, S., Ben Mohamed, A. (2002) Impact of climate change on agricultural production in the Sahel - Part 2. case study for groundnut and cowpea in Niger. *Climatic Change* 54, 349-368.

World Bank, (2007) *World Development Indicators*. International Bank for Reconstruction and Development/ the World Bank, Washington DC, USA.

World Bank (2008) Reports on Environment issues by World Bank's Vulnerability and Adaptation, Climate Change and Poverty units.

Zavala, J.A., Casteel, C.L., DeLucia, E.H., Berenbaum, M.R. (2008) Anthropogenic increase in carbon dioxide compromises plant defense against invasive insects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, 5129-5133.

Zorita, E., von Storch, H. (1999) The analog method - a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate* 12, 2474-2489.

Figures captions

Fig. 1. Summarized workflow to predict future agricultural production

Fig. 2. Papers used in the analysis sorted by authors (top left), countries (top right) and crops (bottom)

Fig. 3. Distribution of future yields according to the 16 selected studies (all countries, time horizons, crops...). The full line represents the 347 points altogether and the dashed one only the points with no CO₂ fertilization (190 points)

Fig. 4. Distribution of yields for studies using statistical crop models (dashed line) and for studies using process-based crop models (full line).

Fig. 5. Distribution of yields for two warming categories: radiative forcing ≥ 3.9 W/m² (dashed line) and < 3.9 W/m² (full line).

Fig. 6. Impact of rainfall on yield. “All” is the boxplot of the yields evolution for the whole study (increasing and decreasing rainfall altogether). “Positive” shows yields when rainfall increases ($\geq 5\%$), “null” when rainfall does not change ($[-5\%; +5\%]$) and “negative” when rainfall decreases ($\leq -5\%$) This is only based on values from Schlenker & Lobell 2010. The bold line is the median, the lower hinge is the 1st quartile, the upper hinge is the 3rd quartile and the whiskers extend to the distribution extremes.

Fig. 7. Distribution of yields for the Sudano-Sahelian area (full line) and the Guinean one (dashed line)

Fig. 8. Relative yield change differences between full and no CO₂ fertilization within a study

Table 1

Reference	Climate model	Crop model	Scenario	Area	Horizon	Crop	C. Fert	Baseline
Adejuwon 2006	HadCm2	EPIC	1%/year in CO ₂	Nigeria	2035/2055/2085	cassava,maize, millet, rice, sorghum	yes	1960/1990
Benmohamed 2002	MAGICC+SCENGEN	empirical	-10% rain; +10% tempe// -20%; +20%	Niger	2025	millet	no	1968/1998
Butt 2005a	HadCm, CGCM	EPIC+PHYGROW +NUTBAL	Greenhouse Gases Integrations	Mali	2030	cotton, cowpea,groundnut,maize, millet, sorghum	yes	1960/1991
Fischer 2005	HadCm3,CSIRO, CGCM2,NCAR	AEZ+BLS	A2	SSA	2080	global	yes	1961/1990
Nelson 2009	NCAR, CSIRO	IMPACT+DSSAT	A2	SSA	2050	global, maize, millet, rice, sorghum, wheat, soybean, groundnut	yes/no	2000
Jonesthornton 2003	HadCM2	CERES-maize	Not found	WA (details)	2055	maize	no	"1990 climate normals"
Liu 2008	HadCM3	GEPIC	A1FI, B1, A2, B2	SSA, WA (details)	2030	global, cassava, maize, millet, rice, sorghum, wheat	yes	1990/1999
Lobell 2008	20 GCMs	empirical	A1B, A2, B1	WA	2030	cassava, groundnut, maize, millet, rice, sorghum, wheat, yams	no	1998/2002
Muller 2010	CCSM3+ECHAM5+ ECHO-G+GFDL+HADCM3	LPJmL	A1B+A2+B1	WA	2050	global	yes/no	1996/2005
Paeth 2008	REMO	MOS (empirical)	B2	Benin	2025/2020	beans,cassava,cotton, groundnut,maize, rice, sorghum, yams	no	1979/2003
Parry 2004	HadCM3	empirical+BLS	A1FI,A2A,A2B, A2C,B1A,B2A, B2B	WA	2020/2050/2080	global	yes/no	1990
Salack 2006	Scenario	DSSAT 4	(+1°C, +1.5°C, +3°C)/ (+5%,+10%, +20%)	Niger/Burkina	2020/2050/2080	millet mtdo/zatib, sorghum	no	1961/1990

Schlenker 2010	16 GCMs	empirical	A1B	WA (details)	2055	cassava, groundnut, maize, millet, sorghum	no	1960/2002
Smith 1996	CCCM, GFD3, GISS	DSSAT 3	2* CO ₂	Gambia	2075	groundnut, maize, millet late, millet early	yes	1951/1990
Tingem 2009	GISS, HadCM3	Cropsyst	A2, B2	Cameroon	2020/2080	bambara nut, groundnut, maize, sorghum, soybean	yes	1961/1990
Vanduivenbooden 2002	MAGICC+SCENGEN	empirical	-10% rain; +10% temp// -20%; +20%	Niger	2025	cowpea, groundnut	no	1968/1998

Table 1 : parameters used in the studies selected for the plots in this review. The area quoted means that we considered this zone to provide results. When “details” is added in brackets, this means that we detail values for this area at a finer scale. WA: West Africa, SSA: Sub Saharan Africa.

Figure1

[Click here to download high resolution image](#)

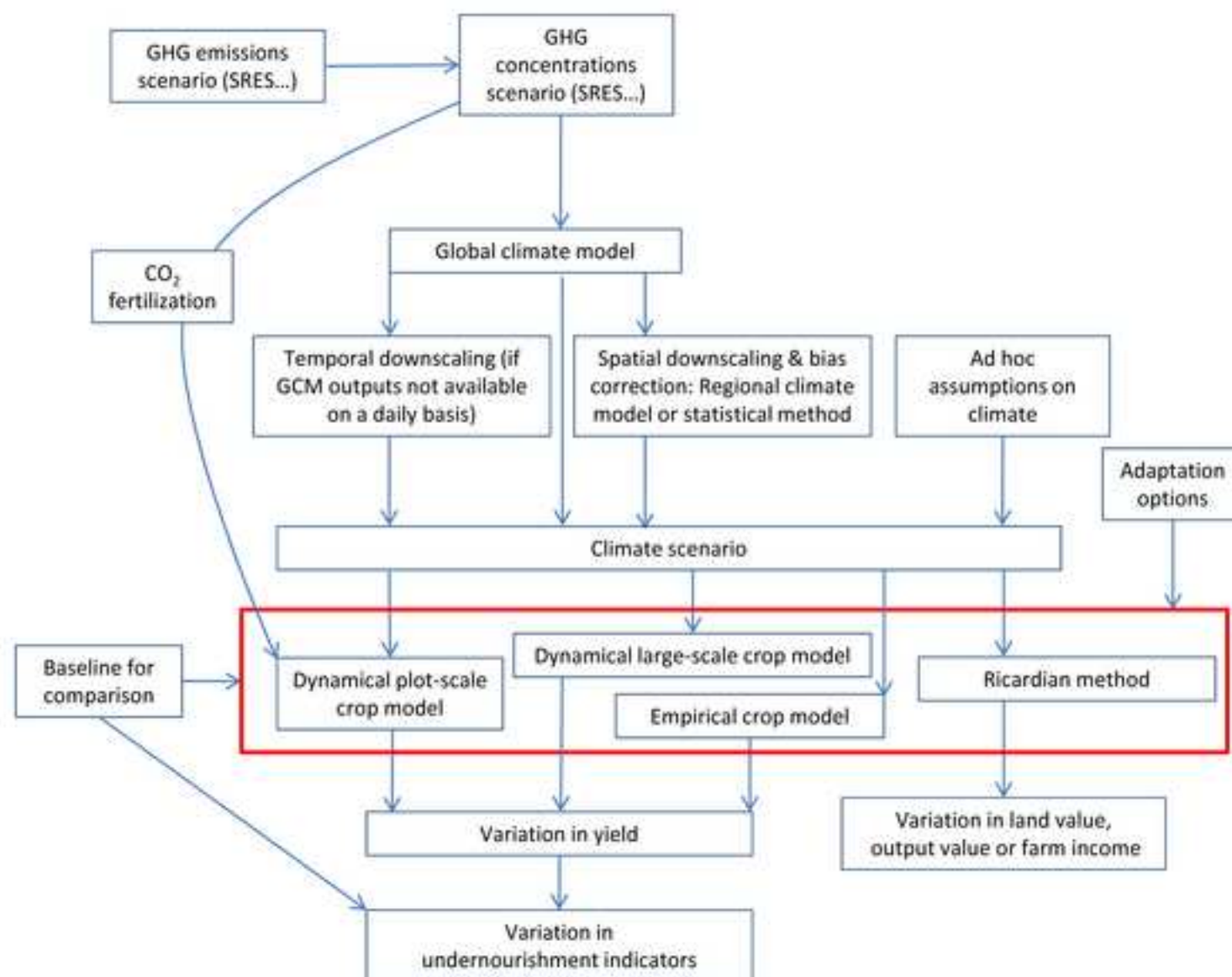


Figure2

[Click here to download high resolution image](#)

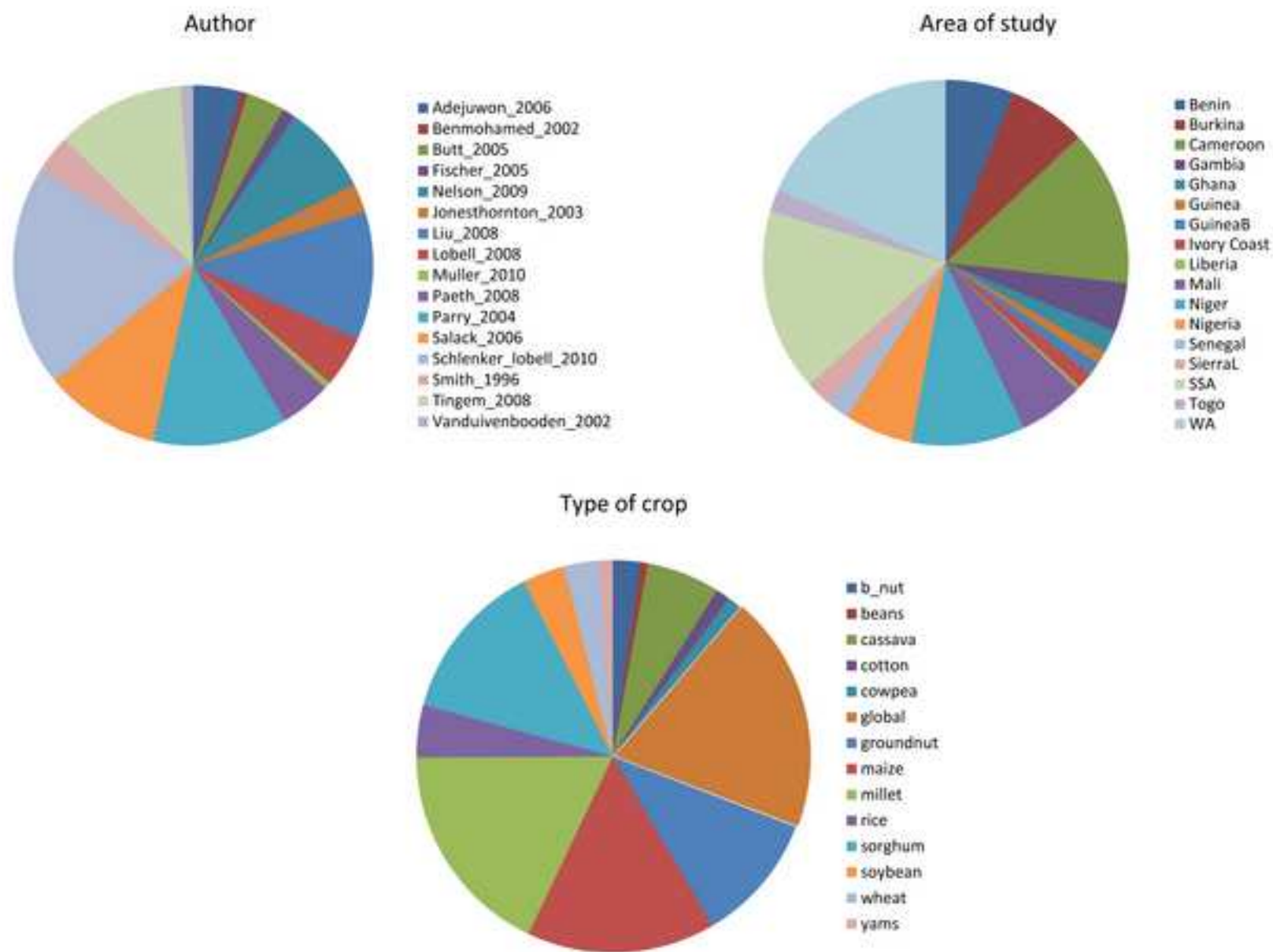


Figure3

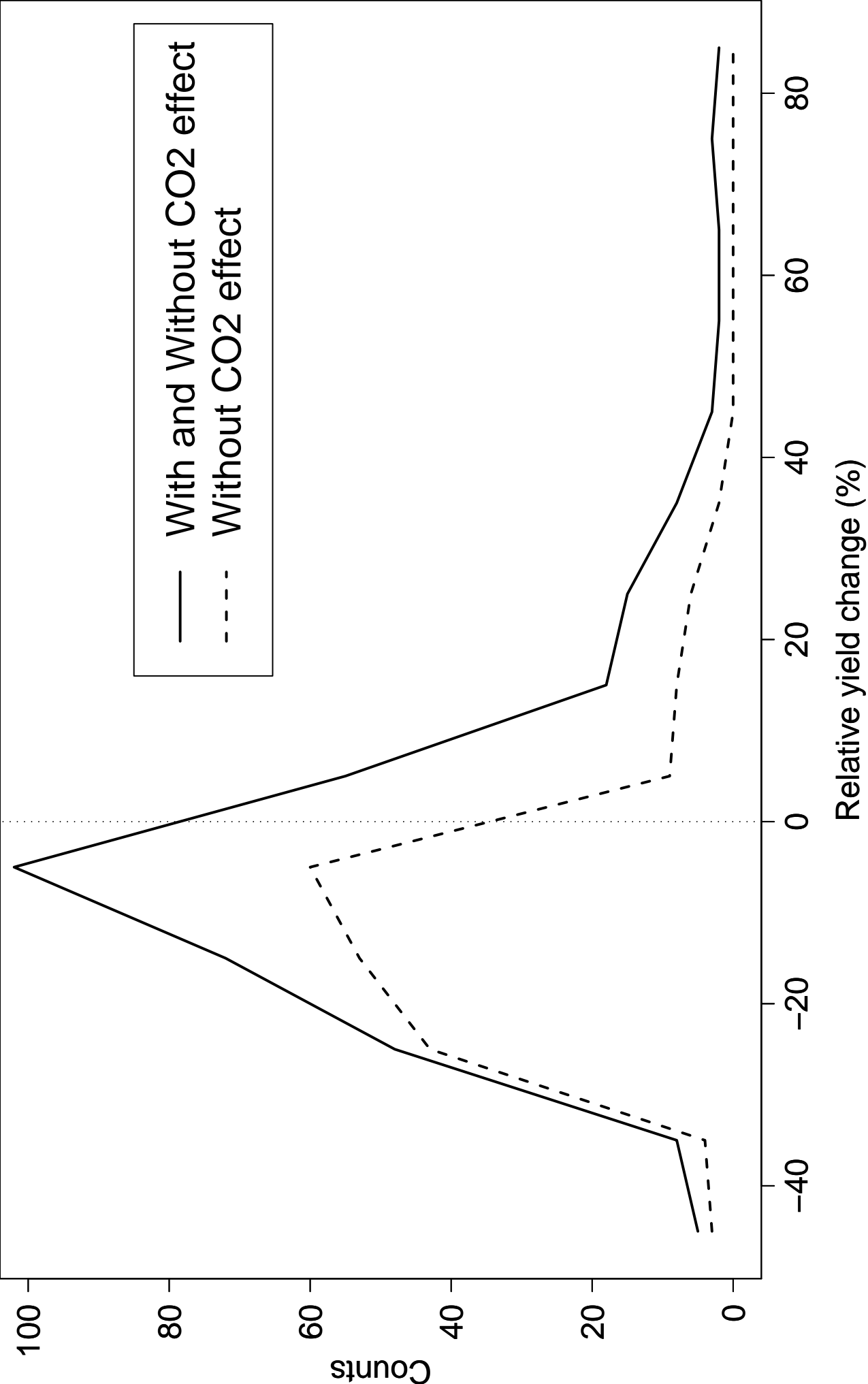


Figure4

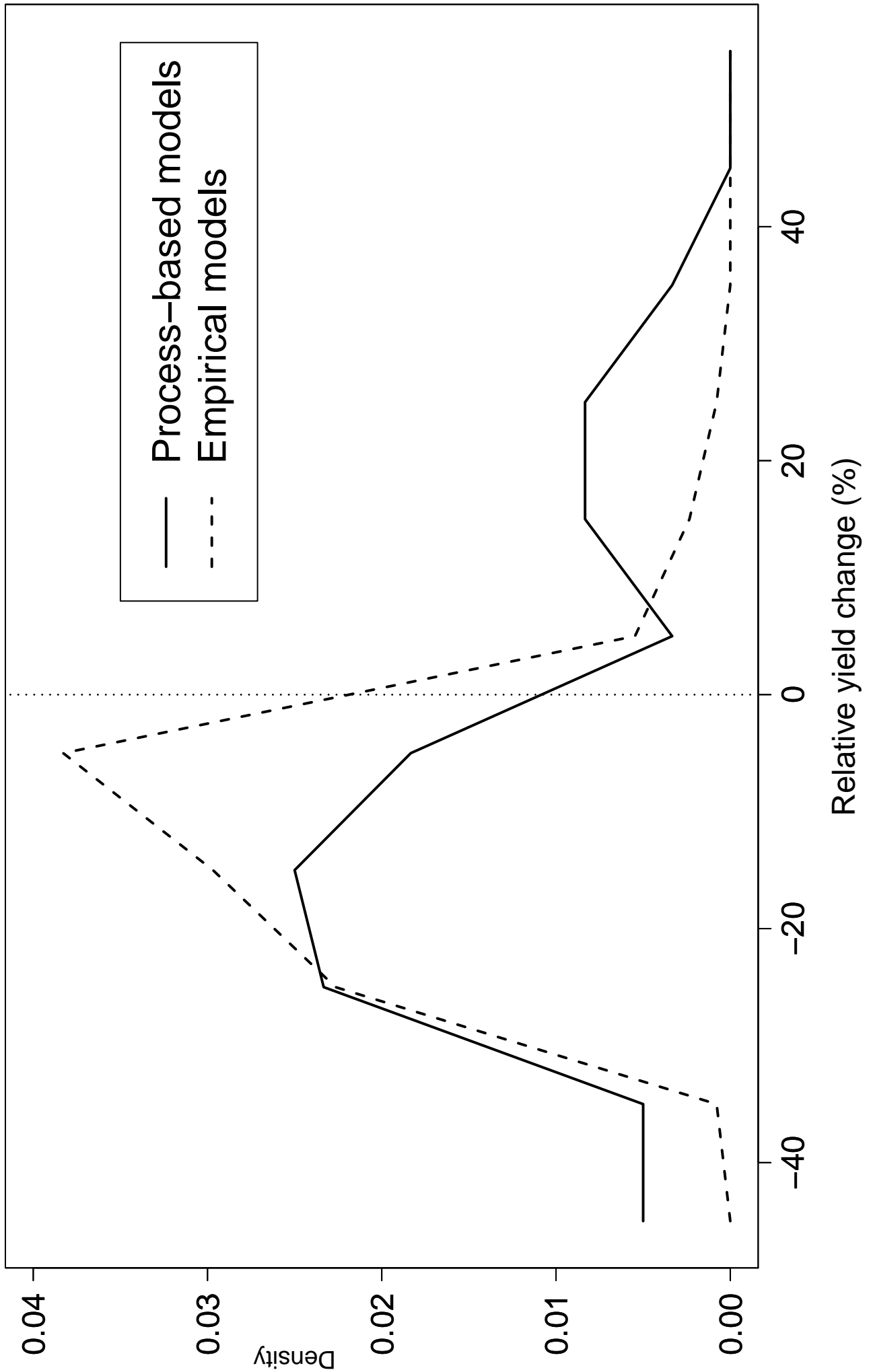


Figure5

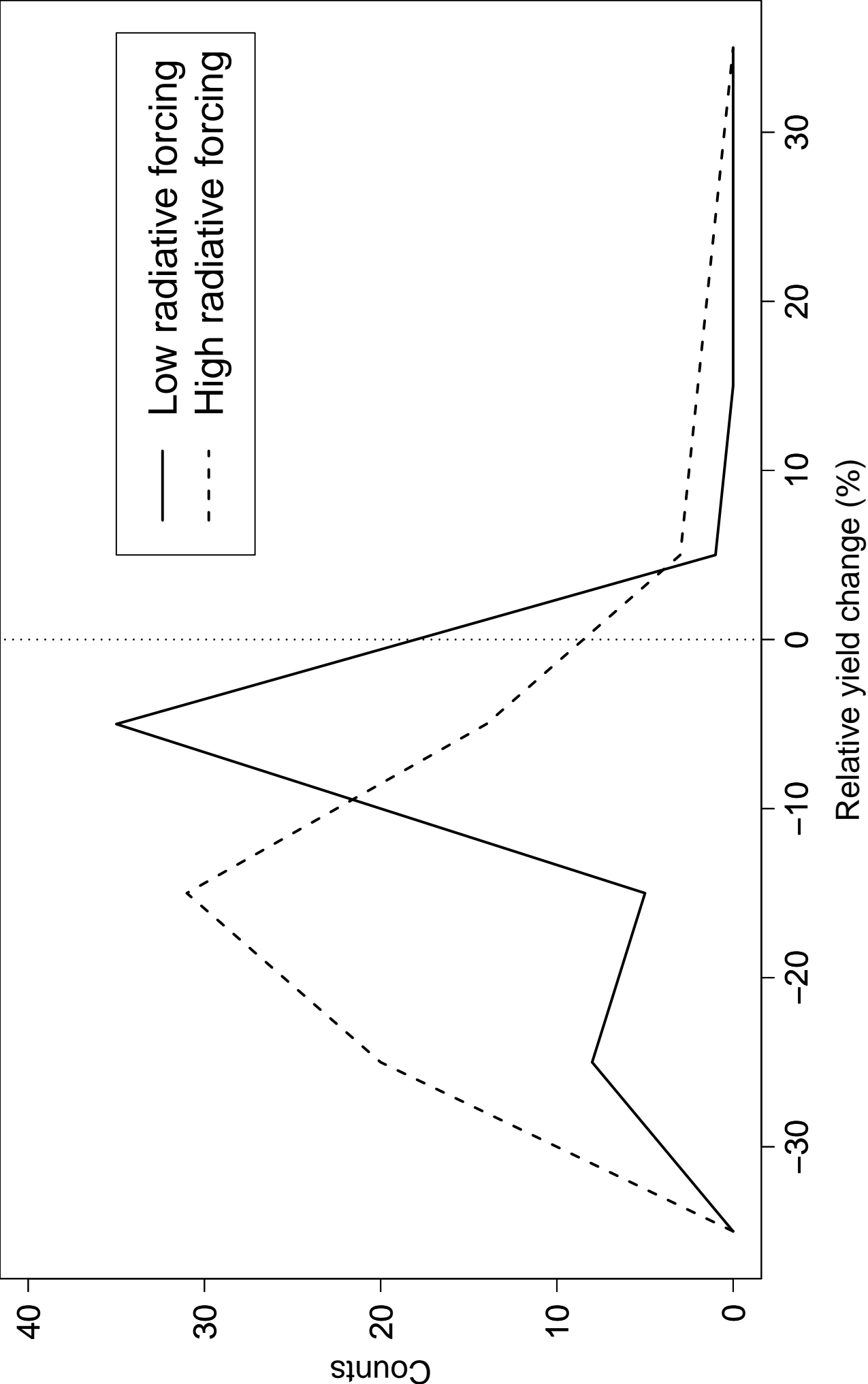


Figure6

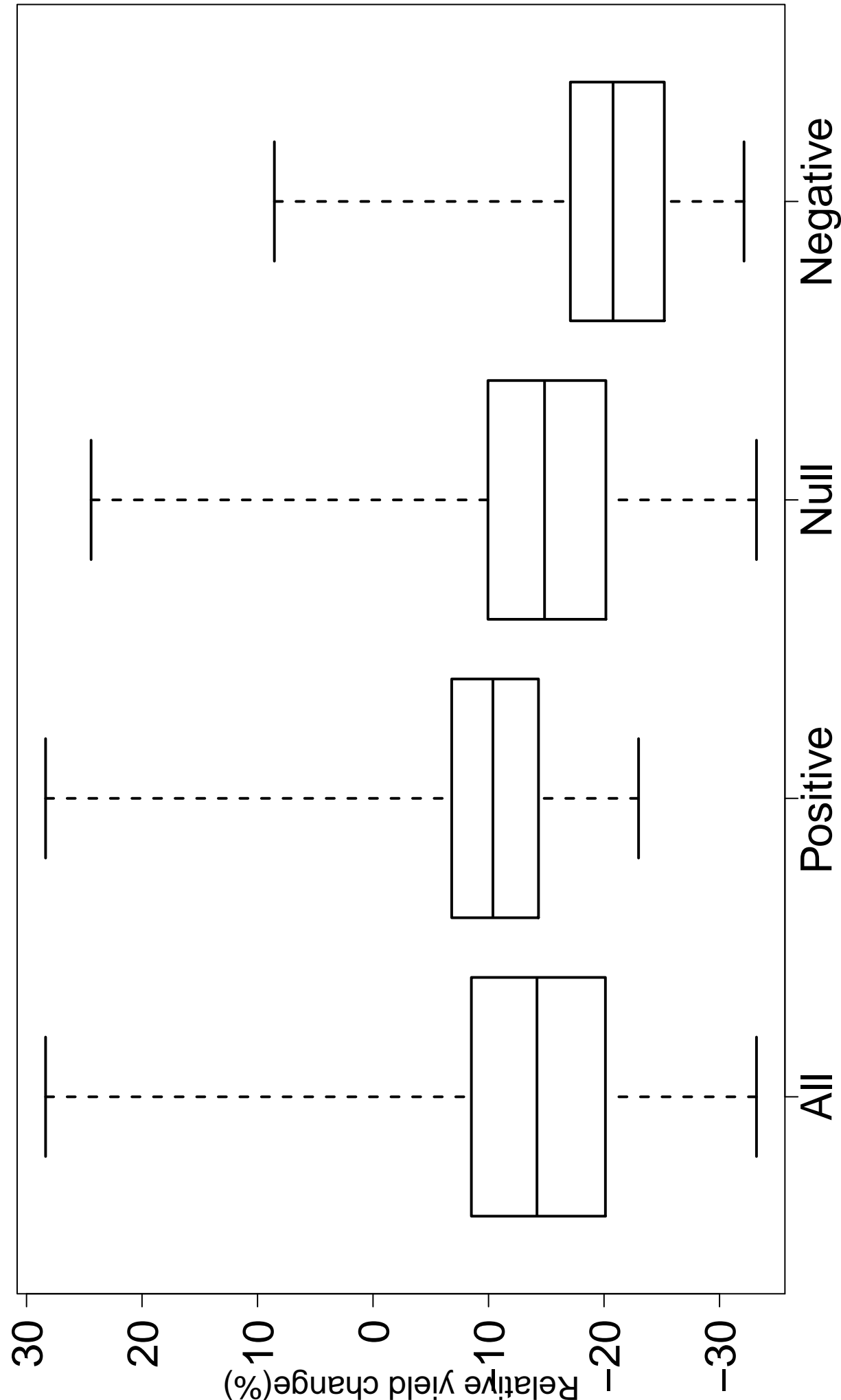


Figure7

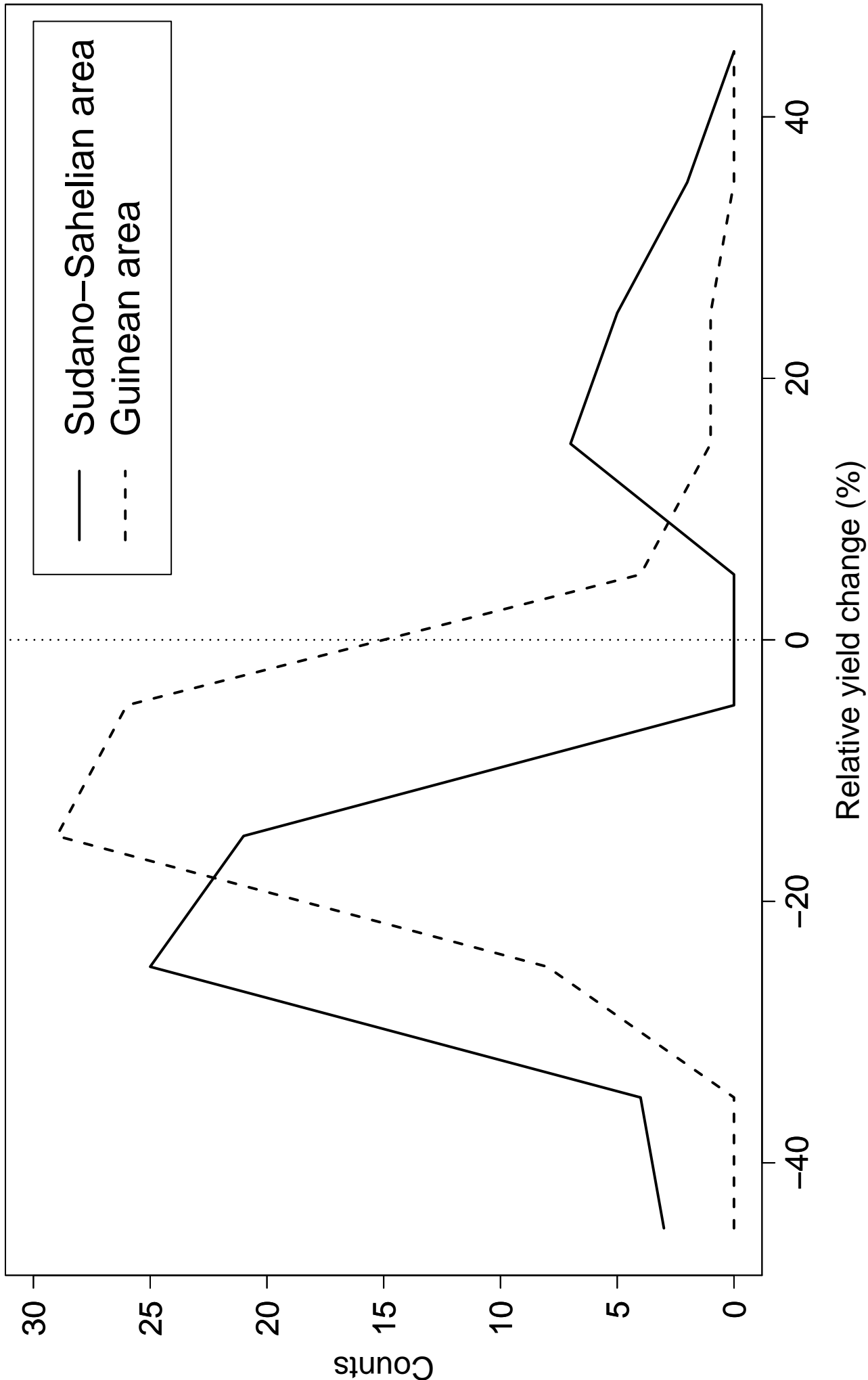


Figure8

