

# THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS VI

présentée par

Sébastien GERVOIS

pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

*Spécialité : Fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale*

*Laboratoire d'accueil : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA - CNRS)*

## **Les zones agricoles en Europe : évaluation de leur rôle sur les bilans d'eau et de carbone à l'échelle de l'Europe ; sensibilité de ces bilans aux changements environnementaux sur le vingtième siècle**

soutenue le 18 octobre 2004

devant le jury composé de :

Mme Katia Laval	Présidente du jury
M. Bernard Saugier	<i>Rapporteur</i>
M. Wolfgang Cramer	<i>Rapporteur</i>
M. Alain Perrier	<i>Directeur de thèse</i>
M. Bernard Seguin	<i>Examineur</i>
Mme Nathalie de Noblet-Ducoudré	<i>Co-directeur de thèse</i>
M. Philippe Ciais	<i>Co-directeur de thèse</i>



## Remerciements

Mes plus vifs remerciements vont à Nathalie de Noblet-Ducoudré qui a eu la lourde tâche de m'encadrer tout au long de ces trois années de ma thèse. Elle a su m'apprendre avec beaucoup de patience la rigueur scientifique nécessaire à la bonne réalisation d'une thèse. Je la remercie tout particulièrement pour ses encouragements et son optimisme, ainsi que pour m'avoir guidé sur la route longue et sinueuse de la thèse.

Je tiens à remercier Philippe Ciais qui est à l'origine du financement de ma thèse et sans qui tout ceci n'aurait pas été possible. Je lui suis très reconnaissant d'avoir suivi de très près le déroulement de ce travail et de m'avoir prodigué de nombreux éclaircissements sur les processus du cycle du carbone. Il m'a aussi aidé et aiguillé dans les moments délicats et les hésitations.

Je remercie tout spécialement Nicolas Viovy qui a assuré une partie de l'encadrement de la thèse et a toujours su me donner conseils avisés et encouragements aux moments difficiles. Je lui suis particulièrement reconnaissant de m'avoir familiarisé avec beaucoup de patience avec le monde nébuleux du modèle, et plus particulièrement avec l'utilisation du modèle ORCHIDEE, et pour son aide quant à la résolution de tous les problèmes informatiques.

Mes remerciements s'adressent bien évidemment à Alain Perrier, mon directeur de thèse, qui a su me guider dans le cheminement de ce travail et me donner de très bons conseils en modélisation et en agronomie.

J'ai une profonde reconnaissance envers Nadine Brisson et Bernard Seguin qui ont accepté de collaborer de manière très étroite. Ils m'ont permis d'utiliser le modèle STICS et m'ont éclairé sur les spécificités des plantes cultivées et les pratiques agricoles. Sans eux, une grande partie de la thèse n'aurait pu voir le jour. Merci infiniment Nadine et Bernard.

Je suis particulièrement reconnaissant à Bernard Saugier et Wolfgang Cramer d'avoir accepté de juger mon travail en tant que rapporteurs de la thèse. Je remercie également Katia Laval pour avoir accepté de participer au jury de thèse.

Merci à Laurent Turpin, Sylvie Jousseau et Pascale Delécluse qui m'ont accueilli au sein du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (UMR CEA – CNRS).

Bernard Seguin et Bernard Saugier ont suivi le déroulement de mon travail en tant que membres de mon comité de thèse. Ils m'ont apporté tout au long de la préparation de nombreuses précisions et des conseils très précieux. Je leur exprime ici ma gratitude.

La thèse a également été l'occasion de collaboration avec des laboratoires étrangers dont l'expérience est complémentaire de la nôtre. C'est ainsi que j'ai été amené à coopérer avec Pete et Jo Smith qui m'ont accueilli dans leur laboratoire d'écologie de l'Université d'Aberdeen. Ce fut une expérience vraiment très enrichissante pour mon travail et je les remercie pour les échanges qu'ils ont permis sur l'évaluation du modèle.

Je n'oublie pas les informaticiens dont l'assistance a été si souvent requise, en particulier Jean-Yves Peterschmitt pour toutes les astuces si précieuses qu'il m'a suggérées. Je remercie Yann Meurdesoif qui a pérennisé le couplage : de cette manière, l'acquis a pu être enregistré durablement et commodément pour les utilisations futures.

Ces trois années passées au sein de l'équipe « Climat » ont été vraiment enrichissantes tant sur les plans scientifiques qu'humains, et je suis très reconnaissant à Gilles Ramstein pour son soutien, ainsi qu'à Masa Kageyama, Pascal Yiou, Florence Gerry, Sylvie Charbit, Pascale Braconnot, Olivier Marti ...

Mais le laboratoire n'est pas uniquement un espace dévolu au travail, c'est aussi un lieu de vie et je pense tout particulièrement à mes camarades pour ces moments de bonne humeur et de spontanéité qui assurent le bonheur et enjolivent le quotidien : Laurent, Philippe (le montagnard), Yannick, Charlie, Nicolas et Marie-Pierre, mais aussi Claire, François, Sophie, Anne, Sébastien, Sylvia, Emmanuel, Liva, Nathalie, Didier, Tobias, Yan... J'adresse une pensée particulière à Jérôme, Juliette, Nicolas et Marie pour les échanges de conseils avisés sur le fonctionnement d'ORCHIDEE. Je pense aussi à Pascalle qui a la lourde tâche de reprendre la suite de mon travail.

Je n'oublie pas ma famille pour son soutien inconditionnel à mes efforts et tous ses encouragements, ni mes amis pour leur présence et leur soutien à mes côtés, Samy pour tous ces week-ends auvergnats pleins de gaieté, ainsi que Roger et Carole. Une pensée toute particulière aussi à Marie, Sophie, Alexandra, David, Pierre, Cécile, Tristan, Sébastien et Manu, pour tous ces moments tout simples de bonheur partagé.

## Résumé

De nombreuses études ont mis en évidence le rôle fondamental joué par les zones agricoles sur le bilan hydrique et le bilan d'énergie de la surface (flux de chaleur latente, flux de chaleur sensible, albédo, ruissellement, ...), ainsi que sur les réserves hydriques et les stocks de carbone du sol. Toutefois, les zones cultivées sont à l'heure actuelle représentées de manière incomplète dans les modèles globaux. Mieux les modéliser à l'échelle continentale apparaît de plus en plus comme une nécessité car elles occupent des superficies importantes (35% de l'Europe de l'Ouest), et d'autre part elles possèdent des caractéristiques propres (développement rapide, longues périodes de sol nu, présence d'irrigation, ...).

Cette thèse vise à quantifier l'impact des zones agricoles sur le bilan hydrique, le bilan d'énergie et le bilan de carbone à l'échelle de l'Europe de l'Ouest. Pour cela, le modèle global de biosphère de l'IPSL (ORCHIDEE) a été couplé au modèle agronomique de l'INRA (STICS), puis appliqué sur les trois cultures les plus répandues que sont le blé, le maïs et soja. Le nouveau modèle nommé ORCHIDEE-STICS a ensuite été validé sur les flux d'eau et de carbone sur deux sites agricoles américains. La disponibilité des données d'indices foliaires satellitaires, ainsi que les statistiques de rendements fournies par la FAO nous ont permis de poursuivre la validation à l'échelle de l'Europe.

La comparaison à l'échelle de l'Europe d'ORCHIDEE-STICS avec la version standard d'ORCHIDEE (qui symbolise en première approximation les prairies naturelles) met en évidence les résultats suivants. Dans le cas des cultures, la saisonnalité des flux échangés entre la surface et l'atmosphère est plus marquée. L'exportation d'une partie de la biomasse de la culture lors de la récolte contribue à diminuer le stock de carbone du sol de 20% à 30% suivant le type de culture. L'avantage des cultures d'hiver par rapport aux cultures de printemps a pu être confirmé en terme de meilleure gestion des réserves hydriques du sol, et ce sur l'ensemble de l'Europe. Pour étudier la sensibilité des cultures à l'évolution de chacun des trois facteurs environnementaux (CO<sub>2</sub>, climat, pratiques agricoles), trois scénarios ont été réalisés où chacun de ces facteurs varie de manière séparée. Les résultats montrent la prépondérance des pratiques agricoles en termes d'impacts sur l'évolution de la productivité des cultures, des stocks de carbone et des réserves hydriques du sol.

## Abstract

Croplands cover about 35% of Europe's land surface (about a hundred million hectares) their impact on water and carbon fluxes must therefore be estimated. Global biosphere models such as ORCHIDEE (Krinner *et al.*, submitted) have been conceived to simulate natural systems only, so croplands are described as grasslands. Croplands depend not only on climate and soil conditions but also on irrigation, fertilisers impact, sowing date... In addition, crop species are usually selected genetically to shorten and accelerate their growth. Crop models such as STICS (Brisson *et al.*, 1998a) give a more realistic picture of croplands as they are especially designed to account for this human forcing. On the other hand they can be used at local scale only. First we evaluated the ability to the two models to reproduce the seasonal behaviour of the leaf area index (LAI), the aboveground biomass, and the exchanges of water vapor and CO<sub>2</sub> with the atmosphere. For that, we compare the model outputs with the measurements performed at two sites that are representative of most common European crops (wheat and corn). As expected the crop model STICS better behaves than the biosphere model ORCHIDEE in representing the seasonal cycle of above variables.

In order to get a realistic representation of croplands areas at regional scale, we decided to couple ORCHIDEE with STICS. First we present the main steps of the coupling procedure. The principle consists in forcing ORCHIDEE with five outputs from STICS: LAI, harvest date, nitrogen stress, root profile, and vegetation height. On the other hand, ORCHIDEE computes its own carbon and water balances. The allocation scheme was also modified in ORCHIDEE in order to preserve coherence between LAI and leaf biomass, and we added a harvest module into ORCHIDEE. The coupled model was validated against carbon and water fluxes observed respectively at two fields (wheat and corn) in the US. We also conducted at European scale two simulations experiments where all arable lands are covered by wheat and corn for the first one and by natural grasslands for the second one. We compared the fluxes between these two simulations. In the case of crop cover, the vegetative period is reduced and the carbon absorption is enhanced (until 20%) during the maximum extension of vegetation. This resulted in changes in the seasonal cycle of surface fluxes and an improved simulation of soil water amount. Moreover, the export of aboveground biomass at harvest decreases the soil carbon content. We also built three scenarios over the last century, where each environmental factor (CO<sub>2</sub>, climate, and agricultural practices) varied. The changes in agricultural practices have a major impact on crop yield and soil water and carbon contents.

This work shows that croplands can be integrated into global biosphere model to simulated CO<sub>2</sub> and water vapor regional fluxes, which should allow a better representation of those ecosystems for climate studies.

# TABLE DES MATIERES

<b>Chapitre 1 - Introduction générale</b>	<b>11</b>
1.1 Les actions anthropiques susceptibles de modifier le climat	11
1.2 Contexte de l'étude : l'impact du changement de couverture végétale sur le climat et les stocks de carbone	12
1.3 Motivations de la thèse	14
1.4 Organisation de la thèse	16
<b>Chapitre 2 - Les modèles utilisés : ORCHIDEE et STICS</b>	<b>17</b>
2.1 Le développement récent des modèles globaux	17
2.2 Le modèle ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms)	19
2.2.1 La phénologie	22
2.2.2 La photosynthèse	24
2.2.3 L'allocation des assimilats	26
2.2.4 La décomposition de la matière organique	28
2.2.5 L'hydrologie du sol	29
2.3 Le développement récent des modèles agronomiques	31
2.4 Le modèle STICS (Simulateur MULTIdisciplinaire des Cultures Standards)	32
2.4.1 La croissance foliaire	35
2.4.2 La croissance racinaire	37
2.4.3 Le bilan de l'azote et le stress azoté	38
2.5 Conclusion	38
<b>Chapitre 3 - Développement et validation sur sites d'ORCHIDEE-STICS : un nouvel outil pour mieux représenter les cultures</b>	<b>41</b>
3.1 Introduction	41
3.2 Calibration et validation sur sites du modèle ORCHIDEE-STICS	41
3.2.1 Choix de la méthodologie du couplage	41
3.2.2 Architecture du couplage entre ORCHIDEE et STICS	42
3.3 Article sous presse dans <i>Earth Interactions</i> : "Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites	45
3.4 Analyses complémentaires à l'échelle locale	69
3.4.1 L'efficacité de conversion	69
3.4.2 Les stocks de carbone du sol	70
3.4.3 Le double calcul du bilan hydrique et du bilan d'énergie : comparaison de la température de surface et du contenu eau du sol simulés par ORCHIDEE – STICS et par STICS.	72
3.5 Conclusion	73

<b>Chapitre 4 - Impact des zones cultivées sur les bilans d'eau et de carbone à l'échelle de l'Europe</b>	<b>75</b>
4.1 Introduction	75
4.2 Présentation des simulations	75
4.2.1 Choix des cultures pilotes : le blé tendre d'hiver, le maïs grain et le soja	76
4.2.2 Les données de forçage	76
4.3 Validation d'ORCHIDEE-STICS	78
4.3.1 Evaluation des irrigations calculées par STICS pour le maïs	78
4.3.2 Comparaison des rendements simulés avec les données de la FAO	79
4.3.3 Comparaison des indices foliaires simulés avec les données de télédétection	82
4.4 Etude comparée entre ORCHIDEE et ORCHIDEE-STICS	86
4.4.1 Le cycle saisonnier du LAI plus marqué pour les cultures	86
4.4.2 Les réserves hydriques mieux conservées	88
4.4.3 Changement de saisonnalité des différents termes du bilan d'énergie	94
4.4.4 Les sols agricoles plus pauvres en carbone	99
4.4.5 Synthèse	104
4.5 Conclusion	106
<b>Chapitre 5 - Evaluation de l'évolution de la productivité agricole et des stocks de carbone et d'eau au cours du XX<sup>e</sup> siècle</b>	<b>107</b>
5.1 Contexte et objectifs de l'étude	107
5.2 Présentation des données de forçage	109
5.2.1 Pour les deux simulations de contrôle	109
5.3.2 Pour les trois simulations transitoires sur le siècle	111
5.3 Comparaison des deux simulations de contrôle	113
5.3.1 Comparaison des productions primaires nettes du blé et du maïs	115
5.3.2 Evaluation des rendements du début du siècle	117
5.3.3 Comparaison des stocks de carbone	119
5.4 Rôle du CO <sub>2</sub> , du climat et des pratiques culturales sur le système agricole pendant le XX <sup>e</sup> siècle	119
5.4.1 Evolution comparée des rendements	120
5.4.2 Evolution des stocks de carbone	124
5.4.3 Evolution du bilan hydrique (réserve en eau du sol, évapotranspiration)	126
5.5 Synthèse des résultats sur le siècle	129
5.6 Perspectives	129
5.6.1 L'impact du changement d'utilisation des sols	129
5.6.2 Et le siècle futur ?	130
<b>Chapitre 6 - Conclusion et perspectives</b>	<b>133</b>
6.1 Conclusion	133
6.2 Perspectives	136

<b>Annexes</b>	<b>139</b>
Annexe A : Article publié dans les Notes Scientifiques de l'IPSL : « Vers une meilleure prise en compte des surfaces cultivées dans un modèle global de biosphère (ORCHIDEE) : couplage avec un modèle agronomique (STICS) », 24 novembre 2002.	141
Annexe B : Article sous presse dans la revue <i>Agronomie</i> (issue spéciale STICS) : « 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 »	179
Annexe C : Procédure d'exécution des simulations avec ORCHIDEE et STICS	191
<b>Bibliographie</b>	<b>197</b>



# Chapitre 1.

## Introduction générale

---

### 1.1 Les actions anthropiques susceptibles de modifier le climat

Le climat est modifié par les actions de l'homme comme la combustion d'énergie fossile et le changement de couverture végétale. Depuis le début de la révolution industrielle, la combustion d'énergie fossile dans le monde a provoqué l'élévation de la teneur des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le CO<sub>2</sub>, en particulier, a augmenté de 280 ppm en 1850 à 370 ppm aujourd'hui. Cette élévation est en partie responsable du réchauffement observé depuis le début du siècle (IPCC, 2001). Actuellement, l'utilisation de combustible fossile et la déforestation libèrent sept gigatonnes de carbone par an, dont seulement trois s'accumulent dans l'atmosphère, deux sont piégés dans l'océan. Il reste donc un puits de deux gigatonnes, qui se situe dans la biosphère terrestre comme le montrent les études réalisées pour l'hémisphère Nord par Tans *et al.* (1990) et par Bousquet *et al.* (2000). Les conséquences des activités anthropiques risquent d'être importantes et inquiétantes pour le siècle à venir. Le dernier rapport IPCC (2001) prévoit une élévation de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, qui atteindrait, suivant les scénarios, une concentration comprise entre 700 et 1000 ppm en 2100. En conséquence, le climat devrait se réchauffer en moyenne sur le globe entre 1.5°C et 5.8°C. Ces valeurs sont importantes quand on pense que seulement 3°C séparent la température moyenne annuelle de la région parisienne (11°C) de celle de Montpellier (14°C). C'est pourquoi un des objectifs de la communauté internationale est de réduire les émissions de gaz à effet de serre, matérialisé par la signature du protocole de Kyoto en 1997.

Comparées à l'augmentation des gaz à effet de serre, les modifications de la couverture végétale sont beaucoup plus anciennes. En Europe occidentale, les premiers défrichements remontent au Néolithique (8 000 BP), ce qui coïncide avec l'apparition de nombreux pollens de graminées dans les relevés polliniques (Peaglar *et al.*, 1989). Ces défrichements sont plus marqués à partir de l'époque romaine. La forêt reconquiert du terrain au Haut Moyen Âge, puis il y a de nouveau une période de grands défrichements autour de l'an mille. Après une déprise agricole due aux pestes à partir de 1300, on assiste à une grande période de pâturages qui culmine au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Suit une reconquête de la forêt récente avec l'exode rural (parfois accélérée : reboisements) jusqu'à nos jours. L'ensemble des forêts européennes ne sont plus des forêts naturelles car elles sont gérées et exploitées. Au cours du XX<sup>e</sup> siècle et en particulier depuis les années 60, on assiste à un changement en profondeur du paysage agricole (intensification des pratiques agricoles, remembrement, ...). Les cultures apparaissent désormais comme un système à part entière orienté vers la production, et est désormais plus dépendant des pratiques agricoles que des conditions climatiques. Cette évolution n'est pas transposable à toutes les parties du monde, en particulier au monde tropical où les défrichements sont plus récents et devraient se poursuivre sur le siècle futur selon les projections d'Alcamo *et al.* (1998). Dans ces régions, les cultures sont très souvent encore extensives. Les conséquences sur le climat des changements de couverture végétale sont plus nombreuses. Nous présenterons au paragraphe suivant quelques résultats disponibles pour les zones tropicales puis pour les régions tempérées.

## 1.2 Contexte de l'étude : l'impact du changement de couverture végétale sur le climat et les stocks de carbone

La complexité et le nombre de rétroactions entre la surface et l'atmosphère obligent à recourir à la modélisation. Pour représenter l'atmosphère, des Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGAs) ont été développés en premier dans lesquels la représentation de la surface qu'elle soit océanique ou continentale est simplifiée. Les modèles de circulation générale océanique, puis les modèles de végétation sont apparus plus tardivement. Pour étudier les rétroactions entre la végétation et le climat, des expériences numériques ont été réalisées, comme le remplacement d'une couverture forestière par des prairies ou bien des cultures. Les études aujourd'hui disponibles ont été réalisées à des échelles de temps et d'espace différentes.

Les premières études ont porté sur les zones tropicales, car la dynamique atmosphérique y est plus sensible aux variations des états de surface. Chacune de ces études est bâtie sur la comparaison de deux simulations où la carte de végétation prescrite diffère. Pour la deuxième simulation, une partie de la couverture forestière d'une grande forêt tropicale (Amazonie, Guinée) a été remplacée par des herbacées :

- Nobre *et al.* (1991) ont montré que la déforestation de l'Amazonie entraîne une diminution des précipitations. L'impact de la déforestation concerne essentiellement la saison de maximum pluviométrique (de février à mai).
- Xue et Shukla (1993) montrent que les pluies diminuent sur le Sahel, mais augmentent sur la zone soudanienne dans le cas de la désertification de la bande sahélienne. Le changement de circulation atmosphérique associé présente des similitudes avec celle observée lors des années les plus sèches sur le Sahel.
- Zheng *et al.* (1997) simulent les conséquences de la disparition de la forêt tropicale guinéenne. Les gradients méridiens de température et d'énergie, moteurs de la dynamique de la mousson sur l'Afrique de l'Ouest sont réduits. En conséquence, les précipitations régressent de manière dramatique sur la région sahélienne.

Ces trois études mettent en évidence à l'échelle régionale qu'une déforestation entraîne généralement une diminution de l'évapotranspiration et donc de l'eau disponible pour l'atmosphère et en conséquence, une diminution des précipitations.

Plus récemment, les modélisateurs se sont intéressés aux zones extra-tropicales. Les trois études suivantes sont construites sur le même principe que les études que nous venons de présenter sur le domaine tropical. Une carte de végétation potentielle (essentiellement forestière) est utilisée pour la première simulation, et une carte de végétation actuelle (une partie des forêts est remplacée par des cultures) pour la seconde. :

- Betts (1999, 2001) simule des étés plus frais sur l'Europe de l'Ouest dans le cas d'une végétation déforestée, car l'albédo de surface a augmenté. Zhao *et al.* (2001) montrent un réchauffement de la saison estivale provoqué par une diminution de l'albédo. Les modèles utilisés diffèrent dans les deux premières études, et donc la représentation de l'indice foliaire des prairies. Pour Betts, dans l'expérience de déforestation, les forêts ont été remplacées par des prairies naturelles : l'indice foliaire, voisin de 3, est inférieur à celui des forêts, l'albédo de surface est plus élevé dans le cas des prairies. Inversement, dans l'étude de Zhao *et al.*, les forêts ont été remplacées par des cultures. Les indices foliaires sont plus

élevés que ceux des forêts. Cette différence s'explique par le fait que le rendement de la photosynthèse est plus élevé dans le cas des cultures (apport d'engrais). L'indice foliaire est fonction en partie de la photosynthèse. En conséquence, l'albédo de surface simulé sera plus faible dans le cas des cultures dans la deuxième expérience.

- De Noblet-Ducoudré (2000) montre des hivers à la fois plus doux et plus humides sur l'Europe de l'Ouest du fait du renforcement de l'advection d'air océanique, dans le cas d'une végétation anthropisée. La saison estivale apparaît plus fraîche, notamment sur les régions continentales en relation avec l'augmentation de l'ETR, dans l'étude de De Noblet – Ducoudré, la différence simulée entre les forêts et les prairies est plus marquée sur l'ETR que sur l'albédo : l'effet de l'ETR est dominant et un refroidissement est simulé.

D'autres études utilisées la même méthodologie mais avec un modèle régional :

- Bonan *et al.* (1999) montre que les changements de végétation anthropiques sur les Etats-Unis ont provoqué une baisse jusqu'à 3°C des températures maximales de surface estivales et automnales, en raison d'une augmentation de l'albédo de surface.
- Xue (1996) montre une diminution des précipitations estivales sur la Mongolie dans le cas d'une déforestation. Les précipitations estivales sont majoritairement convectives, leur dynamique est plus sensible aux états de surface continentaux.

Aux moyennes latitudes, la modification de la végétation peut affecter de manière plus complexe l'ensemble de la dynamique atmosphérique. Les changements des caractéristiques physiques de la surface (augmentation de l'albédo, diminution de la rugosité) produites par la déforestation affectent les températures de surface. L'étude de la sensibilité du climat au changement de couverture végétale a aussi été conduite avec un modèle de complexité intermédiaire à l'échelle globale. Brovkin *et al.* (1999) ont fait évoluer séparément la couverture végétale et la concentration en CO<sub>2</sub> sur le dernier millier d'années. Ils montrent que le changement de couverture végétale a contribué à refroidir le climat entre 0.4°C et 0.5°C et que l'augmentation du CO<sub>2</sub> est responsable de l'élévation de 1°C de la température moyenne provoquée. Sur le dernier siècle, le changement de couverture végétale, c'est-à-dire principalement la déforestation, provoque un refroidissement du climat, qui tend à s'opposer au réchauffement actuel global. Ces études montrent qu'un changement de couverture végétale à l'échelle régionale ou globale, affecte la dynamique atmosphérique de manière importante. Néanmoins, la représentation des zones cultivées est simplifiée dans les modèles utilisés, leur paramétrisation est voisine de celle des herbacées naturelles. Compte tenu des superficies importantes occupées par les cultures, et de des rétroactions entre la végétation et l'atmosphère précédemment mises en évidence, il apparaît nécessaire de les représenter de manière réaliste dans les schémas de surface.

La modification de la couverture végétale affecte également les stocks de carbone du sol. Actuellement, la déforestation tropicale entraîne un déstockage important de la réserve de carbone du sol et participe donc à l'augmentation actuelle de la concentration dans l'atmosphère du CO<sub>2</sub> d'environ 3.2 GtC.an<sup>-1</sup>. A titre de comparaison, la combustion d'énergie fossile est responsable de l'augmentation de 6.3 GtC.an<sup>-1</sup> (IPCC, 2001). La déforestation des zones tempérées a déjà eu lieu en grande partie et ne contribuent que de 0.1 GtC.an<sup>-1</sup> à l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (Houghton *et al.*, 1999). En Europe de l'Ouest, les forêts tendent à regagner du terrain au cours des vingt dernières années (IFEN, 2002). Sur la période 1850-2000, la superficie totale des forêts tropicales a diminué quasiment de la moitié, passant de 30.5 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> à 16.8 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, ce qui a libéré

78.6 GtC dans l'atmosphère, soit la moitié des émissions dues à la combustion d'énergies fossiles. Pendant le même temps, la transformation des forêts tempérées en zones cultivées a libéré 44.6 GtC. Il s'agit essentiellement des forêts d'Asie et d'Amérique du Nord. En Europe, les grands défrichements sont plus anciens et remontent au Moyen Âge. Si l'on considère le rôle des surfaces agricoles sur la dynamique du carbone du sol, Arrouays *et al.* (2002) montrent que les stocks de carbone des sols agricoles sont plus faibles que les sols forestiers ou prairiaux, même si les valeurs dépendent des pratiques culturales, en particulier la présence ou non de labour. Smith *et al.* (1997) montrent que la conversion d'une prairie en zone cultivée libère une partie du carbone du sol dans l'atmosphère en raison d'une part du labour et d'autre part du fait qu'une partie de la biomasse de la culture est retirée du champ au moment de la récolte. Janssens *et al.* (2003) ont montré que les zones agricoles étaient une source de carbone pour l'atmosphère, comprise entre 0.1 et 0.4 tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> en considérant uniquement le changement d'utilisation des terres. Ces chiffres mettent en évidence l'importance du changement d'utilisation des sols (déforestation, mise en culture) mise sur le bilan de carbone. Dans cette thèse, nous étudierons le rôle des zones agricoles à l'échelle de l'Europe sur le cycle de carbone, en mettant en évidence les principaux facteurs qui influent sur le stockage du carbone.

### 1.3 Motivations de la thèse

Les motivations la thèse sont doubles :

#### a) Les zones agricoles :

Les nombreuses études réalisées dans la communauté internationale, dont nous en avons présentées une partie, montrent le rôle important joué par les surfaces agricoles, sur le bilan énergétique de la surface, les flux échangés avec l'atmosphère et, donc la circulation atmosphérique de l'échelle régionale, mais aussi sur le cycle du carbone. Toutefois, les zones cultivées sont à l'heure actuelle représentées de manière incomplète dans la plupart des modèles globaux.

Les cultures occupent des superficies importantes (35 % de l'Europe de l'Ouest). À l'échelle mondiale, ces superficies (aujourd'hui 13 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, soit 10% des terres émergées hors Antarctique et Groenland) sont amenées à fortement augmenter au siècle prochain (Alcamo *et al.*, 1998). C'est donc aujourd'hui une nécessité que de les prendre en compte dans les modèles afin d'évaluer leur participation au changement climatique. Dans le cadre de cette thèse, nous étudierons le rôle des zones agricoles sur le bilan hydrique, le bilan d'énergie (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente, réserve en eau du sol), des caractéristiques de la surface (albédo, rugosité), et le cycle de carbone (productivité primaire, flux net, stocks de carbone du sol). Les variations simulées sur les différents termes du bilan hydrique font l'objet d'une attention particulière car les cultures sont des grosses consommatrices d'eau, l'irrigation représente 12 % (soit 4.5 Gm<sup>3</sup>.an<sup>-1</sup>) en moyenne de la consommation d'eau brute en France (Ramade, 1995).

Le modèle global de l'IPSL, ORCHIDEE (Krinner *et al.*, soumis) sera utilisé dans cette thèse. Il simule le développement de la végétation et les caractéristiques de la surface (bilan d'énergie, d'eau et de carbone) à un pas de temps très fin (inférieur à l'heure) pour pouvoir représenter de manière la plus réaliste possible les processus instantanés. Dans ORCHIDEE, les différents types

de couverts végétaux sont regroupés en 13 types fonctionnels de plantes (PFT) qui peuvent coexister au sein de la même maille. Cependant, ORCHIDEE, comme la plupart des modèles globaux disponibles dans la communauté internationale, a été développé pour les systèmes naturels. Comme dans les autres modèles globaux, la représentation des cultures y est très simplifiée : elles sont assimilées à des prairies naturelles, à l'exception du rendement de la photosynthèse qui est renforcé, afin de tenir compte de l'effet des fertilisants.

Pour améliorer la représentation des zones agricoles dans un modèle global de végétation, nous avons choisi de nous appuyer sur les nombreux travaux éco-physiologiques et agronomiques. A partir de ces études, de nombreux modèles agronomiques ont été développés ces vingt-cinq dernières années. Il existe de très nombreux genres (blé, maïs, soja, tournesol, pois, moutarde, luzerne, betterave, sorgho...). Pour chacun d'entre eux, on distingue de nombreuses espèces. Pour le blé (qui couvre 4 300 000 ha), qui est la céréale la plus cultivée au monde avec le riz, on distingue tout d'abord le blé dur et le blé tendre, puis le blé tendre de printemps et le blé tendre d'hiver. Il existe de très nombreuses variétés : par exemple, pour les blés tendres d'hiver, les variétés *Talent* et *Soisson* sont les plus courantes, mais il y en a beaucoup d'autres. Notre objectif est de développer un outil robuste, générique pour rester dans la philosophie d'ORCHIDEE.

#### **b) L'Europe :**

Nous avons choisi de limiter notre étude à l'Europe de l'Ouest pour les raisons suivantes. Le paysage y est complètement modifié par l'homme (forêts gérées, prairies, cultures, vergers, vignes, zones urbaines...). L'agriculture européenne est l'une des plus intensives du monde, en conséquence, son impact sur les bilans d'eau et de carbone risque d'être accentué. Les données agronomiques nécessaires à notre étude (caractéristiques des principales céréales, sont à la fois plus abondantes, fiables et disponibles sur l'Europe de l'Ouest qu'ailleurs dans le monde. Nous avons ainsi pu mettre à profit en partie des connaissances acquises au sein de l'INRA (Institut National Recherche Agronomique). Une collaboration préexistait entre le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, le laboratoire où s'est déroulé la thèse) et l'INRA d'Avignon. La thèse a été l'occasion de renforcer cette collaboration tout spécialement avec N. Brisson et B. Seguin. Les données climatiques et la carte de végétation CORINE nous ont été fournies via le projet européen ATEAM. Ce projet vise à évaluer les conséquences du changement climatique futur sur la biosphère dans son ensemble à l'échelle de l'Europe. La fenêtre géographique considérée dans notre étude est celle du projet européen ATEAM, comprise entre 9°W et 20°E en longitude, et entre 35.5°N et 54.5°N). De plus, le travail s'inscrit dans le projet européen CARBOEUROPE dont l'objectif est de quantifier les bilans de carbone (flux et stocks des différents compartiments) de manière la plus précise possible (aussi bien en résolution spatiale que temporelle).

Cette thèse s'inscrit dans l'une des problématiques conduites au LSCE, visant à améliorer le modèle ORCHIDEE en y intégrant les systèmes anthropisés que sont les cultures, les prairies ou bien les forêts gérées. Une thèse est en cours au laboratoire pour intégrer les prairies dans ORCHIDEE (Vuichard *et al.*, en prép.), et la prise en compte des forêts gérées est prévue à terme. Dans la communauté scientifique internationale, on en est encore aux débuts pour ce type d'approche, ce qui fait l'originalité de ma thèse. Si, aujourd'hui, de nombreuses équipes se sont

lancées dans le défi ou bien s'apprêtent à s'y lancer, aucun résultat n'était publié quand nous avons entrepris cette thèse. Nous détaillerons la méthodologie que nous avons employée (c'est-à-dire du couplage entre ORCHIDEE et STICS) en présentant les avantages et les inconvénients de cette chaque des deux méthodes au chapitre 3, et nous justifierons la méthodologie que nous avons suivie.

## 1.4 Organisation de la thèse

La thèse s'organise de la manière suivante :

- Au chapitre 2, nous présenterons les deux modèles utilisés, ORCHIDEE et STICS, en insistant sur leur complémentarité.
- Au chapitre 3, nous décrirons de manière précise la mise au point du nouvel outil, c'est-à-dire du couplage entre ORCHIDEE et STICS, ainsi que les variables échangées entre les deux modèles. C'est un point très important de cette thèse. La nouvelle version du modèle sera appelée ORCHIDEE-STICS. Nous validerons cette nouvelle version sur deux sites américains de blé et de maïs sur les flux d'eau et de carbone. Ce développement fait l'objet d'une publication dans la revue *Earth Interactions* (Gervois et al., sous presse).
- Au chapitre 4, nous effectuerons plusieurs simulations à l'échelle de l'Europe, validées à l'aide des rendements agricoles, et du cycle de l'indice foliaire. Ensuite, la comparaison d'ORCHIDEE-STICS avec la version standard d'ORCHIDEE (qui symbolise les prairies naturelles) permettra de mettre en évidence l'impact de la mise en culture (passage d'une prairie à une culture). Nous nous sommes focalisé sur les variables décrivant les états de surface (albédo, rugosité, température de surface, réserves hydriques du sol) ainsi que sur les flux à l'interface sol-atmosphère (évapotranspiration, flux de chaleur sensible, flux net de carbone, productivité primaire nette). Une partie de cette comparaison a fait l'objet d'une publication dans le numéro spécial STICS de la revue *Agronomie* (de Noblet-Ducoudré et al., sous presse) jointe en annexe (Annexe B).
- Au chapitre 5, nous réaliserons trois simulations transitoires sur le siècle dernier à l'échelle de l'Europe. L'objectif poursuivi est de quantifier le rôle de chacun des facteurs environnementaux que sont le CO<sub>2</sub>, le climat et les pratiques agricoles, sur l'évolution des rendements, des stocks de carbone du sol et des réserves hydriques disponibles sur le XX<sup>e</sup> siècle.
- Enfin, la dernière partie du mémoire donnera les conclusions et perspectives de ce travail.

## Chapitre 2.

### Les modèles utilisés : ORCHIDEE et STICS

---

Ce chapitre est consacré à la présentation des modèles utilisés tout au long de la thèse : d'une part, le **modèle global ORCHIDEE**, et d'autre part le **modèle agronomique STICS**. ORCHIDEE présente des atouts importants car il calcule les échanges d'eau, d'énergie et de carbone entre le système sol-plante et l'atmosphère et il peut être utilisé à différentes échelles spatiales (de l'échelle locale à globale). La limitation principale d'ORCHIDEE pour notre étude est qu'il ne prend pas en compte les spécificités des cultures et notamment les pratiques agricoles (dates de semis, diversité des variétés utilisées, apport d'irrigations et de fertilisants), car il a été développé initialement pour les écosystèmes naturels. Pour pallier ce manque, nous avons choisi de mettre à profit le travail déjà existant en utilisant le modèle agronomique STICS (Brisson *et al.*, 1998a), spécialement conçu et calibré pour reproduire le développement des plantes cultivées. Le choix de STICS s'est fait naturellement en se basant sur une collaboration déjà engagée avec N. Brisson et B. Seguin de l'INRA d'Avignon au début de la thèse. La philosophie des deux modèles est différente. ORCHIDEE est un modèle mécaniste construit pour une utilisation à l'échelle globale, il représente les principaux processus physiologiques (photosynthèse, respiration, phénologie, allocation, respiration, ...). STICS est un modèle plus empirique, initialement développé pour prédire les rendements. Ce chapitre est organisé de la manière suivante. L'historique de développement des modèles globaux et agronomiques sera d'abord présenté. Les principes de fonctionnement d'ORCHIDEE et de STICS seront ensuite présentés en insistant sur l'apport de chaque modèle à notre travail.

#### 2.1 Le développement récent des modèles globaux

La modélisation du climat est apparue dès les années 1950 (Smagorinsky, 1953) et s'est développée dans les années 1960 avec la croissance et la généralisation des moyens informatiques dans les organismes de recherche. Avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, la représentation de l'atmosphère s'est améliorée dans les modèles. Néanmoins, jusqu'au milieu des années 1970, la représentation de la surface continentale et des processus de surface reste simple, et dans ces modèles, l'albédo, la rugosité ou bien l'humidité du sol sont prescrits pour chaque point de grille et sont le plus souvent constants dans le temps. La représentation de la surface continentale dans les modèles s'est aussi beaucoup améliorée, depuis le début des années 1980. On distingue trois branches principales de modèles de végétation :

- **Biophysique** : ces modèles sont appelés schémas de surface ou bien SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer schemes). Ils sont destinés à être couplés à un modèle de circulation générale de l'atmosphère (MCGA). En fonction des données climatiques, ils calculent les échanges d'eau et d'énergie entre la surface continentale et l'atmosphère (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente), ainsi que l'humidité du sol, l'albédo de la surface, les résistances du couvert (stomatique et aérodynamique). Le pas de temps de calcul de ces

modèles est court (inférieur à l'heure) pour pouvoir représenter le cycle diurne des flux. Parmi ces modèles, les plus détaillés et les plus anciens sont SiB (Simple Biosphere Model) (Sellers, 1986) et BATS (Biosphere Atmosphere Transfert Scheme) (Dickinson *et al.*, 1986). Plus récemment, les modèles ISBA de Météo France (Noilhan et Planton, 1989) et SECHIBA pour le LMD (Ducoudré *et al.*, 1993) ont été développés. L'étude de Sellers *et al.* (1997) distingue trois étapes dans le développement et la sophistication de ces modèles. Les schémas de surface, dits de « première génération », ont une représentation de la surface très simple : la représentation de la végétation est constante dans le temps (l'albédo, la rugosité) et les flux échangés ne dépendent que de la demande climatique. Les modèles de « seconde génération » ont une végétation rétroactive, et ils simulent l'absorption du rayonnement incident par le couvert végétal, l'interception de la pluie par le feuillage, les transferts de quantité de mouvement entre l'atmosphère et le couvert, la résistance stomatique, le stress hydrique. Enfin, les modèles dits de « troisième génération » sont beaucoup plus complets parce qu'ils incluent une partie des processus du cycle du carbone (photosynthèse notamment). Par exemple, la photosynthèse a été ajoutée dans SECHIBA (Viovy, 1997) et dans ISBA (Calvet *et al.*, 1998). SECHIBA (Schématisation des Échanges Hydriques à l'Interface entre la Biosphère et l'Atmosphère) est le module biophysique d'ORCHIDEE.

- **Biogéochimique** (cycle du carbone) : ce sont les modèles simulant les flux et réservoirs biosphériques de carbone. On peut regrouper ces modèles en deux sous-ensembles :
  - L'objectif de ces modèles est de simuler la Productivité Primaire Nette (NPP en anglais). Ce sont des modèles empiriques. La NPP peut être une fonction du facteur le plus limitant entre la température et les précipitations, comme pour le modèle OBM (Esser et Lieth, 1989). D'autres modèles sont fondés sur l'utilisation de données satellitaires et la NPP est fonction du rayonnement, de la température, ainsi que du type de végétation. Les lois de dépendance de la NPP sont déduites des données mesurées d'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en biomasse. Le modèle TURC (Ruimy *et al.*, 1994) appartient à cette catégorie.
  - Les modèles à la fois mécanistes et empiriques, c'est-à-dire pour lesquels une partie des paramétrisations reposent sur des lois physiques et biologiques (photosynthèse, allocation, respiration, décomposition). Ces modèles sont les plus nombreux, comme par exemple les modèles TEM (Raich *et al.*, 1991), CASA (Potter *et al.*, 1993) et SLAVE (Friedlingstein *et al.*, 1995). STOMATE (Saclay Toulouse Orsay Model Analysis of Terrestrial Ecosystems) (Viovy, non publié) est le module biogéochimique d'ORCHIDEE.
- **Biogéographique** : ces modèles reconstituent la répartition spatiale de la végétation naturelle en fonction des conditions climatiques à l'équilibre (températures et précipitations principalement), comme par exemple le modèle BIOME (Prentice *et al.*, 1992). Ces modèles ont été améliorés et ils peuvent désormais reproduire les étapes transitoires quand la répartition végétale évolue suite à un changement climatique. Ils sont alors appelés « modèles dynamiques de végétation » comme le modèle LPJ (Lund Postdam Jena) (Sitch *et al.*, 2003). Les paramétrisations spécifiques à la dynamique de la végétation de LPJ ont été incluses dans ORCHIDEE. Dans le cadre de cette thèse, ces paramétrisations sont désactivées car nous prescrivons la carte de végétation.

Ces dernières années, des modèles globaux de biosphère « complets », intégrant des processus biophysiques, biogéochimiques et dynamiques, sont apparus, comme par exemple les modèles IBIS (Foley *et al.*, 1996 ; Kucharik *et al.*, 2001) et ORCHIDEE (Krinner *et al.*, soumis). Ils permettent de représenter les processus de surface, ainsi que les échanges entre la surface

continentale et l'atmosphère de manière interactive à différentes échelles (du local à celle d'un point de grille de MCGA).

## **2.2 Le modèle ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems)**

ORCHIDEE (Krinner *et al.*, soumis) simule les processus biophysiques de la biosphère continentale avec les principales composantes, tant du point de vue du bilan hydrique (évapotranspiration, évaporation du sol, interception, transpiration, réserves en eau du sol, écoulement latéral) que de celui du bilan d'énergie (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente, rayonnement net, rayonnement infrarouge terrestre). Les principaux processus physiologiques et biogéochimiques sont aussi calculés (photosynthèse, allocation, phénologie, compétition pour la lumière, respiration, décomposition) : les stocks de carbone des différents compartiments (plante, litière, humus) et les flux entre ces différents réservoirs et l'atmosphère (photosynthèse, respiration, décomposition). Toutefois, le cycle des nutriments, et en particulier celui de l'azote, n'est pas simulé de manière explicite. La maille élémentaire d'ORCHIDEE comprend plusieurs types de couvert regroupés en 13 types fonctionnels de plantes (PFT) (tableau 2.1). Les PFTs ont été séparés en arbres d'une part et herbacées d'autre part. Pour les arbres, on distingue le type de feuilles : aiguilles ou feuilles, puis le type de phénologie (décidu ou sempervirent), et enfin le climat moyen (boréal, tempéré ou bien tropical). On sépare les herbacées, en herbacées naturelles et agricoles, puis suivant le type de photosynthèse ( $C_3$  et  $C_4$ ). L'ensemble des PFT est présenté dans le tableau 2.1. Les cultures sont représentées par deux PFTs séparés : les cultures en  $C_3$  et les cultures en  $C_4$ . Leur traitement dans ORCHIDEE est très simple, identique à celui des herbacées naturelles à l'exception du rendement prescrit de la photosynthèse, qui est plus élevé, pour intégrer de manière implicite l'effet des fertilisants et de la sélection génétique (cf. 2.2.2).

PFT	Description
1	Sol nu
2	Forêt tropicale sempervirente
3	Forêt tropicale saisonnière
4	Forêt de conifères, tempérée sempervirente
5	Forêt de feuillus, tempérée sempervirente
6	Forêt de feuillus, tempérée saisonnière
7	Forêt de conifères, boréale sempervirente
8	Forêt de feuillus, boréale saisonnière
9	Forêt de conifères, boréale saisonnière
10	Herbacées en C <sub>3</sub>
11	Herbacées en C <sub>4</sub>
12	Cultures en C <sub>3</sub>
13	Cultures en C <sub>4</sub>

Tableau 2.1 : Les treize types fonctionnels de plantes (PFTs) dans ORCHIDEE.

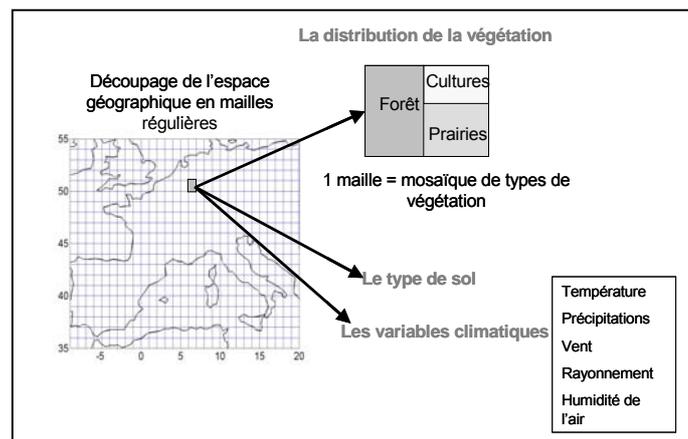


Figure 2.1 : Les variables à renseigner pour chacune des mailles pour une simulation avec ORCHIDEE : la superficie occupée par chacun des PFTs, le type de sol et les variables climatiques.

Le principe de fonctionnement d'ORCHIDEE est présenté sur la figure 2.2 qui montre le schéma d'interaction entre la partie biophysique (SECHIBA) et la partie biogéochimique (STOMATE). Seuls seront décrits ici les processus dont le calcul sera modifié lors du couplage entre ORCHIDEE et STICS au chapitre 3. Il s'agit principalement de la phénologie, de l'allocation des assimilats, de la photosynthèse et de l'hydrologie du sol. Pour la description des processus, nous ne présenterons que ceux relatifs aux PFTs étudiés, c'est-à-dire les herbacées en C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub>.

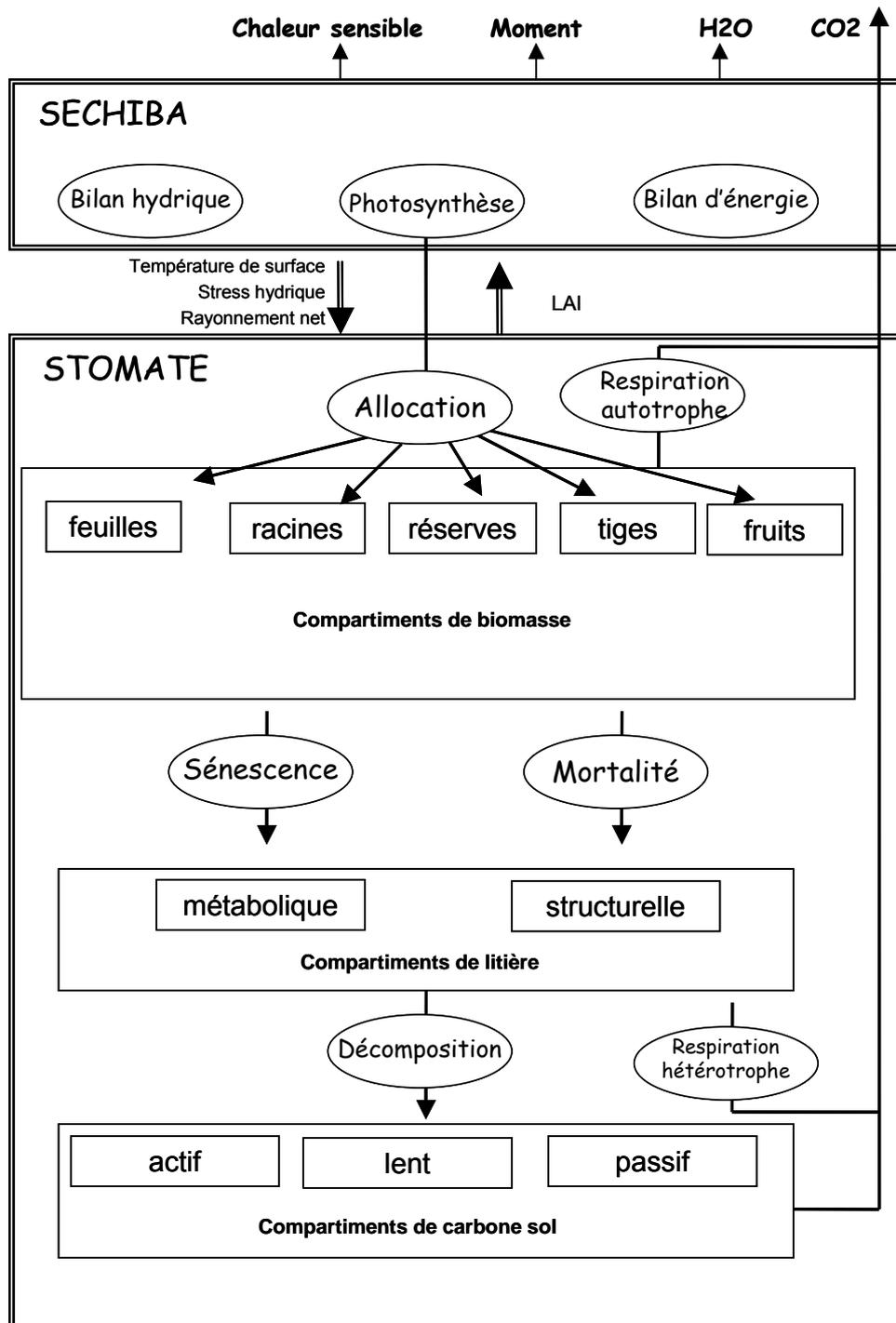


Figure 2.2 : Présentation du modèle de biosphère ORCHIDEE, d'après Krinner et al. (soumis), modifié.

La partie dynamique de la végétation, extraite de LPJ, ne figure pas ici. Les flèches en traits simples symbolisent les flux de matière (carbone) ; les flèches à double trait représentent les variables échangées ; les ellipses représentent les principaux processus ; et les rectangles les principaux réservoirs.

## 2.2.1 La phénologie

### a) Le début de cycle

La phénologie est calculée avec le modèle développé par Botta (1999), Botta *et al.* (2000). Les deux PFTs d'herbacées sont « génériques » : ils représentent à la fois les herbacées tropicales, où le cycle saisonnier des plantes est conditionné par celui des précipitations, et les herbacées tempérées et boréales, où cette fois le développement est contraint par les températures. Il faut donc que soient remplies simultanément les conditions thermiques et hydriques pour le démarrage de la végétation. Trois conditions doivent être réunies pour initier le cycle végétatif de la plante (figure 2.3) :

- Tout d'abord, la **période de dormance**, comptabilisée depuis la fin du cycle précédent, doit être supérieure à 30 jours. On évite ainsi de redémarrer un nouveau cycle dès la fin de la sénescence si les conditions thermiques et hydriques sont de nouveau favorables.
- Une des deux conditions **thermiques** suivantes doit être satisfaite :
  - On calcule une somme des températures (en degrés.jours) au-dessus d'un seuil prescrit ( $-5^{\circ}\text{C}$  pour les herbacées en  $C_3$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  pour celles en  $C_4$ ) depuis la fin de la période de dormance (GDD). Le démarrage a lieu quand cette somme dépasse la valeur seuil (fonction de la température moyenne annuelle) ( $\text{GDD}_s$ ). Pour une température moyenne annuelle de  $10^{\circ}\text{C}$ , cette valeur-seuil est égale à  $180^{\circ}\text{C.j}$  pour les herbacées en  $C_3$ , et de  $480^{\circ}\text{C.j}$  pour les  $C_4$ .
  - On calcule chaque jour la température hebdomadaire (la moyenne des sept jours précédents) et la température mensuelle (la moyenne des trente jours précédents). Si la température hebdomadaire est supérieure à la température mensuelle, les températures augmentent, c'est le printemps, le démarrage du cycle végétatif est activé.
- L'état **hydrique** du sol doit permettre la croissance : c'est un critère dominant dans les régions tropicales où les températures sont favorables toute l'année. L'état hydrique du sol est représenté par un indice de stress  $W_s$  (défini en section 2.2.5). Une des deux conditions suivantes doit être remplie pour la croissance :
  - L'indice de stress hydrique hebdomadaire (la moyenne des sept derniers jours) est supérieur à l'indice de stress hydrique mensuel (la moyenne sur les trente derniers jours), on démarre le cycle végétatif (dans les régions tropicales, cela correspond approximativement au début de la saison des pluies).
  - L'indice de stress hydrique mensuel supérieur à la valeur seuil prescrite (0.6)

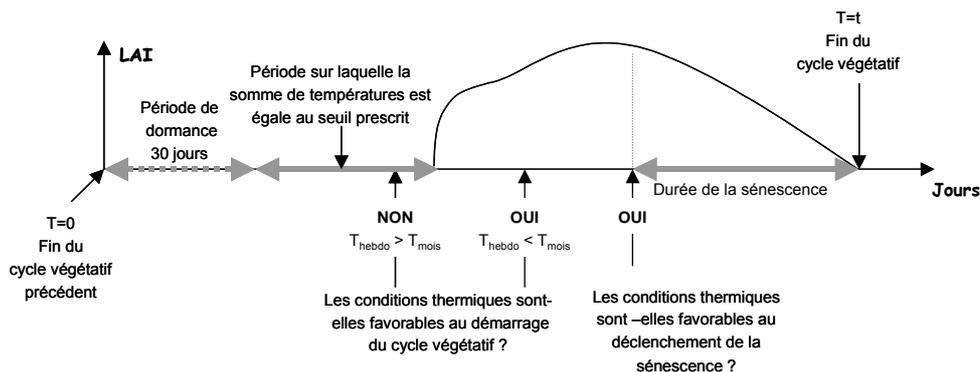


Figure 2.3 : Principe du calcul de la phénologie des herbacées dans ORCHIDEE. On se place ici dans les conditions les plus souvent rencontrées aux latitudes tempérées : seuls les critères thermiques sont considérés, les critères hydriques sont laissés de côté en supposant qu'ils sont toujours satisfaits.

### b) La fin de cycle

Pour le déclenchement de la sénescence, deux critères **climatiques** (thermique et hydrique) sont considérés. Une des deux conditions thermiques suivantes doit être remplie :

- La température hebdomadaire moyenne devient inférieure à une température-seuil (fonction de la température moyenne annuelle). Pour une température moyenne annuelle de 10°C, la température-seuil équivaut à 8°C pour les C<sub>3</sub>, 13°C pour les C<sub>4</sub>.
- La température hebdomadaire est plus basse que la température mensuelle.

De même, une des deux conditions hydriques suivantes doit être satisfaite :

- L'indice de stress hydrique mensuel s'abaisse au-dessous du seuil (0.6).
- L'indice de stress hydrique hebdomadaire devient inférieur à la moyenne mensuelle.

Il y a une troisième condition **physiologique** pour l'âge des feuilles. Si les feuilles dépassent un âge limite prescrit (90 jours pour les herbacées), la sénescence est déclenchée.

### c) Le calcul de l'indice foliaire

L'indice foliaire (LAI) est la surface des feuilles par unité de surface au sol. C'est une variable-clé qui sert de base au calcul des principales variables comme la transpiration ou l'albédo. Il est donc particulièrement important de bien le simuler. Dans ORCHIDEE, le LAI est obtenu en multipliant la biomasse foliaire par la surface spécifique des feuilles (Specific Leaf Area : SLA) qui est prescrite à 0.025 m<sup>2</sup>.gC<sup>-1</sup> pour les herbacées. La biomasse foliaire est calculée chaque jour en fonction de la production primaire nette et de la fraction d'assimilats allouée vers les feuilles. Si la plante est sénescente, une partie de la biomasse des feuilles est convertie chaque jour en litière.

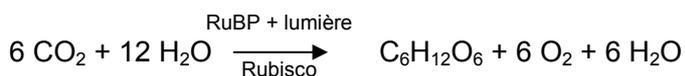
### d) La phénologie des cultures

La phénologie d'ORCHIDEE suit le cycle saisonnier des températures de l'air. Si cela se vérifie pour les herbacées tempérées, cela n'est plus valable dans le cas des cultures car le début du

cycle végétatif dépend de la date de semis. La levée du blé d'hiver se produit généralement entre mi-octobre et mi-novembre. La date du début de la sénescence dépend des températures moyenne sur la période végétative (la sénescence du blé démarre trois semaines plus tôt en Provence qu'en Beauce) et de la variété utilisée (une variété de cycle court comme *Récital* débute sa sénescence deux semaines plus tôt qu'une variété de cycle long comme *Soissons*). En France, la sénescence du blé se produit entre la fin mai et la fin juin suivant les régions et les années. Le schéma de phénologie d'ORCHIDEE ne peut simuler de démarrage à l'automne alors que les températures décroissent, ni de sénescence au mois de juin alors que les conditions sont très favorables à la végétation.

### 2.2.2 La photosynthèse

La photosynthèse permet, grâce à l'action combinée de la lumière et d'une enzyme (la Rubisco), la fixation du CO<sub>2</sub> atmosphérique sous forme de glucide, qui est source d'énergie pour la plante. La réaction du dioxyde de carbone et de l'eau, sous l'action de la lumière et d'un glucide (le Rubilose Bi-Phosphate RuBP), et par une suite de réactions appelée « cycle de Calvin », forme un sucre en C<sub>6</sub> et de l'oxygène.



#### a) La photosynthèse à l'échelle foliaire

Dans ORCHIDEE, le calcul de la photosynthèse à l'échelle foliaire est conditionné par les valeurs des vitesses maximales de carboxylation ( $V_{\text{cmax}}$ ) et de régénération du RuBP ( $V_{\text{jmax}}$ ). Ces paramètres sont liés à la concentration en Rubisco dans la feuille :

$$V_{\text{cmax}} = W_s \cdot T \cdot G_f \cdot V_{\text{cmax0}} \quad (2.1)$$

$$V_{\text{jmax}} = W_s \cdot T \cdot G_f \cdot V_{\text{jmax0}} \quad (2.2)$$

- $V_{\text{cmax0}}$  et  $V_{\text{jmax0}}$  sont respectivement les vitesses potentielles de carboxylation et de régénération du RuBP prescrites. Elles sont identiques dans ORCHIDEE pour les deux PFTs agricoles et valent respectivement :  $V_{\text{cmax0}}=100$  et  $V_{\text{jmax0}}=200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Cette égalité entre les C<sub>3</sub> et les C<sub>4</sub> n'est qu'apparente car le modèle de photosynthèse utilisé est différent.
- $G_f$  est une fonction qui dépend linéairement de l'âge moyen des feuilles : cette fonction croît très vite lorsque la feuille est très jeune (entre 1 et 10 jours) et atteint la valeur maximale (1).  $G_f$  reste fixé à 1 quand l'âge des feuilles est compris entre 10 jours et l'âge critique prescrit pour chaque PFT. Enfin,  $G_f$  décroît linéairement lorsque l'âge critique des feuilles est atteint.
- $T$  est une fonction de la température :  $T=0$  si la température est inférieure à la température minimale-seuil  $T_n$ , ou si elle est supérieure à la température maximale-seuil  $T_x$ .  $T$  est maximum pour la température optimale prescrite ( $T_{\text{opt}}$ ).  $T_n$ ,  $T_x$ ,  $T_{\text{opt}}$  dépendent de la température moyenne annuelle du lieu. Pour une température moyenne de 10°C,  $T_n$  équivaut à -2°C pour les C<sub>3</sub> et 8°C pour les C<sub>4</sub>,  $T_x$  égale 42°C pour les C<sub>3</sub> et 55°C pour les C<sub>4</sub>,  $T_{\text{opt}}$  correspond à 25°C pour les C<sub>3</sub> et 30°C pour les C<sub>4</sub>.
- $W_s$  est l'indice de stress hydrique (calcul décrit en section 2.2.5), qui est compris entre 0 (point de flétrissement) et 1 (capacité au champ).

Le calcul de l'assimilation nette à partir de  $V_{\text{cmax}}$  et  $V_{\text{jmax}}$  dépend du régime de photosynthèse :

**Pour les plantes en C<sub>3</sub>** (comme le blé), les équations sont celles du modèle de Farquhar (1980). On calcule la vitesse potentielle de régénération du RuBP (V<sub>j</sub>) :

$$V_j = \frac{1}{2\theta} \cdot \left[ \alpha_j \cdot I + V_{j\max} - \sqrt{\alpha_j \cdot I + V_{j\max} - 4\theta \cdot \alpha_j \cdot I \cdot V_{j\max}} \right] \quad (2.3)$$

$\alpha_j$  est le rendement quantique de régénération du RuBP

$\theta$  est la courbure de la réponse quantique

I est l'intensité lumineuse incidente

puis la vitesse de réaction de l'enzyme Rubisco (W<sub>c</sub>) :

$$W_c = \frac{V_{c\max} \cdot C_i}{C_i + K_c \cdot (1 + O_i / K_o)} \quad (2.4)$$

C<sub>i</sub> est la concentration en CO<sub>2</sub> dans la chambre stomatique, K<sub>c</sub> et K<sub>o</sub> sont les constantes de Michaelis-Menten pour la vitesse de catalyse enzymatique pour le CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>.

La vitesse de régénération du RuBP (sucre qui initialise le cycle de Calvin) (W<sub>j</sub>) vaut :

$$W_j = \frac{V_j}{1 + \Gamma^* / C_i} \quad (2.5)$$

La vitesse de carboxylation (V<sub>c</sub>) dépend du processus le plus limitant :

$$V_c = \min (W_c, W_j) \quad (2.6)$$

On en déduit l'assimilation nette (A<sub>n</sub>) :

$$A_n = V_c \cdot \left( 1 + \frac{\Gamma^*}{C_i} \right) - R_d \quad (2.7)$$

Où R<sub>d</sub> est la « dark respiration ».

**La photosynthèse des plantes en C<sub>4</sub>** (comme le maïs, le sorgho ou la canne à sucre) est plus efficace. Cela s'explique par la différence de cinétique des enzymes PEP-carboxylase (pour les C<sub>4</sub>) et Rubisco (pour les C<sub>3</sub>). La PEP-carboxylase concentre le CO<sub>2</sub> d'un facteur 10 sur le site de carboxylation. La photorespiration est inhibée. À titre de comparaison, pour le blé, la photorespiration consomme entre la moitié et un tiers du carbone assimilé (Heller *et al.*, 1998). Le rendement de la photosynthèse, déjà élevé, est moins sensible à la concentration d'azote disponible. Dans ORCHIDEE, la photosynthèse des plantes en C<sub>4</sub> est décrite par les paramétrisations de Collatz *et al.* (1992). L'assimilation (A) est égale à la solution la plus petite (en valeur absolue) de ce système de deux équations polynomiales :

$$\Phi \cdot M^2 - M \cdot (V_T + \alpha_T \cdot Q) + (V_T \cdot \alpha_T \cdot Q) = 0 \quad (2.8)$$

$$\beta A^2 - A(M + K_T \cdot C_i) + M \cdot K_T \cdot C_i = 0 \quad (2.9)$$

V<sub>T</sub> est la vitesse de réaction (concentration optimale en enzyme) fonction de la température (c'est l'équivalent de V<sub>jmax</sub> du modèle de Farquhar):

$\alpha_T$  est le rendement quantique de l'enzyme

M est un paramètre fonction du facteur le plus limitant entre l'activité de l'enzyme Rubisco et la lumière.

K<sub>T</sub> est une fonction dépendante de la température au premier ordre

$\Phi$  et  $\beta$  sont les rayons de courbure des deux hyperboles.

### b) La photosynthèse à l'échelle du couvert

Dans ORCHIDEE, le couvert végétal est discrétisé en niveaux verticaux. Le nombre total de niveaux du couvert est fonction du LAI. L'assimilation sur l'ensemble du couvert ( $A_c$ ) est égale à l'intégrale sur l'ensemble du couvert des assimilations élémentaires :

$$A_c = \int_0^{LAI} A_n(l) dl \quad (2.10)$$

L'extinction de la lumière au sein du couvert suit la loi suivante :

$$R(l) = R_0 \cdot e^{-k \cdot l} \quad (2.11)$$

avec  $R(l)$  le rayonnement incident au niveau  $l$  considéré,  $R_0$  le rayonnement incident au sommet du couvert. Le coefficient d'extinction de la lumière dans le couvert ( $k$ ) est prescrit à 0.5. Les plantes ajustent la distribution verticale de l'azote foliaire pour favoriser les niveaux les plus éclairés du couvert. En conséquence, les valeurs de  $V_{cmax}$  et de  $V_{jmax}$ , pour chaque niveau  $l$ , décroissent exponentiellement du haut vers le bas au sein du couvert vers une asymptote dont la valeur correspond à 30 % de la valeur au sommet du couvert :

$$V_{cmax}(l) = V_{cmax}(l=1) \cdot [1 - 0.7(1 - e^{-kl})] \quad (2.12)$$

$$V_{jmax}(l) = V_{jmax}(l=1) \cdot [1 - 0.7(1 - e^{-kl})] \quad (2.13)$$

### c) La photosynthèse des cultures

La paramétrisations de la photosynthèse de Farquhar et de Collatz s'appliquent également aux plantes cultivées (Farquhar, 1980 ; Collatz *et al.*, 1992). Il y a toutefois des différences avec les herbacées naturelles car la conduite de la culture est optimisée pour un rendement maximal (apports d'engrais et de produits phytosanitaires, sélection génétique des plants, éventuellement irrigation), le rendement de la photosynthèse est donc plus élevé. Dans la version standard d'ORCHIDEE, les vitesses maxima de carboxylation ( $V_{cmax}$ ) et de régénération du RuBP ( $V_{jmax}$ ) sont déjà plus élevées que celles des herbacées. Au chapitre 3, les valeurs prescrites de  $V_{cmax}$  et  $V_{jmax}$  d'ORCHIDEE seront comparées avec les données de la bibliographie sur les cultures dans les conditions de fertilisation optimale. De plus, ORCHIDEE ne peut pas représenter la diversité des conditions de nutrition azotée observées dans la réalité.

#### 2.2.3 L'allocation des assimilats

Dans ORCHIDEE, les produits de la photosynthèse sont répartis entre cinq compartiments : feuilles, tiges, racines, fruits et réserves (dans le cas des céréales, une grande partie des réserves de la plante correspond aux grains). Le calcul de l'allocation est adapté à partir du modèle de Friedlingstein *et al.* (1998). Pour les herbacées, l'allocation dépend de la phénologie, et trois cas sont possibles :

- Premier cas : on se situe au tout début du cycle ( $LAI < 0.5 \cdot LAI_{max}$ ) et le cycle a démarré depuis moins de 30 jours. La plante utilise en complément des assimilats alloués, ses réserves formées à la saison précédente pour démarrer son nouveau cycle végétatif.
- Deuxième cas : le cycle est plus avancé mais la plante n'est pas encore sénescente.

- Troisième cas : la plante est sénescente et toute la Production Primaire Nette (NPP en anglais) migre vers les réserves. Chaque jour, une partie de la biomasse des autres compartiments de la plante est transformée en litière.

Pour les deux premiers cas, l'allocation est calculée de la manière suivante : on détermine chaque jour, des fonctions de stress comprises entre 0 (stress maximal) et 1 (aucun stress).

- en eau :  $\sigma_w = \max(0.1, \min(1, W_s))$  (2.14)

$W_s$  est un indice de stress hydrique défini dans la section 2.2.6. Pour éviter les fluctuations trop rapides, on considérera ici la moyenne mobile sur trente jours.

- en lumière ( $\sigma_l$ ) :  $\sigma_l = \max(0.1, e^{-0.5 \cdot LAI})$  (2.15)

- en azote ( $\sigma_n$ ) : Le cycle de l'azote n'est pas simulé de manière explicite dans ORCHIDEE. On considère alors que la disponibilité en azote dépend de deux facteurs limitants. Ces facteurs sont l'humidité du sol moyenne sur les 30 derniers jours ( $\sigma_{nh}$ ) (plus l'humidité est élevée, plus l'azote est disponible) et de la température du sol moyenne sur les 30 derniers jours ( $\sigma_{nt}$ ) (plus la température du sol est proche de la température optimale d'activité des micro-organismes (40°C), plus la disponibilité de l'azote sera élevée). La fonction de stress en azote sera la plus limitante des deux fonctions :  $\sigma_n = \min(\sigma_{nh}, \sigma_{nt})$ . Les fractions d'allocation de la NPP vers les différents compartiments sont déduites des fonctions de stress précédentes. Il est important de remarquer que les stress en eau et en azote jouent dans le même sens, mais leurs effets ne se cumulent pas : c'est le stress le plus limitant qui compte :

- La fraction allouée aux fruits est constante tout au long du cycle végétatif :  
 $f_g = 0.1$  (2.16)

- Pour les tiges :  
 $f_s = 0.3 \cdot (1 - f_g) \cdot \frac{\min(\sigma_n, \sigma_w)}{2\sigma_l + \min(\sigma_n, \sigma_w)}$  (2.17)

- Pour les racines :  
 $f_r = 0.3 \cdot (1 - f_g) \cdot \max(0.15, \frac{3\sigma_l}{\sigma_l + 2 \min(\sigma_n, \sigma_w)})$  (2.18)

- Pour les feuilles :  
 $f_l = 0.3 \cdot (1 - f_g) \cdot \max(0.2, \min(0.5, 1 - f_r - f_s))$  (2.19)

- Pour les réserves :  
 $f_e = 1 - (f_l + f_r + f_s + f_g)$  (2.20)

Ces formules mettent en évidence une compétition entre les tiges et les racines en fonction des facteurs limitants : si la limitation en lumière est importante, alors la plante allouera préférentiellement vers les tiges. En effet, la plante cherche à s'élever le plus possible vers la lumière (ex : conditions de sous-bois). À l'inverse, si c'est la limitation en azote qui est importante, l'allocation se fera alors de façon préférentielle vers les racines au dépend des parties aériennes (tiges et feuilles).

Pour le calcul de la biomasse journalière allouée vers chaque compartiment, on fait appel à un paramètre intermédiaire de calcul (x) :

$$x = \frac{1}{1 + f_l + f_r + f_s} \quad (2.21)$$

$$\text{Réserves : } NPP_e = (1-x) \cdot (1 - f_g) NPP \quad (2.22)$$

$$\text{Feuilles : } NPP_f = x \cdot f_f \cdot (1 - f_g) \text{ NPP} \quad (2.23)$$

$$\text{Racines : } NPP_r = x \cdot f_r \cdot (1 - f_g) \text{ NPP} \quad (2.24)$$

$$\text{Tiges : } NPP_s = x \cdot f_s \cdot (1 - f_g) \text{ NPP} \quad (2.25)$$

Le schéma d'allocation sera modifié dans le cas des cultures, en effet, contrairement aux herbacées naturelles, les racines ont un cycle saisonnier marqué et ne sont pas présentes dans le sol tout au long de l'année, car le labour, qui suit généralement la récolte, les élimine.

## 2.2.4 La décomposition de la matière organique

### a) La litière

Pour chaque maille, on comptabilise la litière de manière séparée sur la partie agricole et sur la partie naturelle. La litière est créée à partir de la biomasse de la plante lors de la sénescence. À son tour, la litière se décompose, une partie retourne sous forme de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, l'autre partie alimente les compartiments de carbone du sol. La litière est discrétisée verticalement : litière aérienne (alimentée principalement par les feuilles et les tiges) et souterraine (alimentée principalement par les racines). Chacun de ces deux réservoirs comprend une fraction métabolique et une fraction structurale, qui diffèrent par le temps de dégradation du carbone. La litière métabolique contient principalement des éléments labiles dont la vitesse de décomposition est assez élevée, comme des sucres ou de la cellulose. Au contraire, la litière structurale contient des éléments à vitesse de décomposition plus lente, comme la lignine. Les temps de dégradation sont d'environ deux à trois mois pour la litière métabolique et de quinze à vingt mois pour la litière structurale en fonction des conditions climatiques (température et humidité du sol notamment).

### b) Les stocks de carbone du sol

La dynamique du carbone du sol provient du modèle CENTURY (Parton *et al.*, 1988). Il n'existe pas de discrétisation verticale du réservoir de carbone du sol, mais trois réservoirs (tableau 2.2) sont distingués. Ce sont les réservoirs actif, lent et passif dont les constantes de temps de décomposition diffèrent (à peu près 1, 30 et 500 ans).

Nom du réservoir de carbone	Type de carbone	Temps de dégradation
Actif	Biomasse microbienne	1 à 5 ans
Lent	Matière organique stabilisée	20 à 40 ans
Passif	Matière organique fortement stabilisée	200 à 1500 ans

Tableau 2.2 : Les trois réservoirs de carbone du sol d'ORCHIDEE (d'après Parton *et al.*, 1988) modifié.

### *c) Les particularités des zones agricoles*

Les paramétrisations décrites pour la minéralisation du carbone (sous forme de litière ou de matière organique) seront considérées comme valables pour les zones agricoles, même si les terres arables sont généralement labourées, et que le labour assure une meilleure oxygénation et donc accélère la minéralisation du carbone du sol. Les paramétrisations et les valeurs des paramètres du calcul de la décomposition de la litière et du carbone du sol n'étant pas modifiées, nous montrerons aux chapitres 3 et 4, quelles limitations impliquent cette simplification dans la simulation des stocks de carbone du sol. L'alimentation en matière organique du sol est modifiée dans le cas des cultures puisqu'une partie de la biomasse est exportée du champ au moment de la récolte.

#### **2.2.5 L'hydrologie du sol**

##### *a) Le contenu en eau du sol*

L'hydrologie du sol de SECHIBA repose sur le modèle de Choisnel (1977). La colonne de sol est représentée par deux réservoirs, la taille de chacun dépend des apports (précipitations et fonte de la neige) et des pertes (évapotranspiration, ruissellement). Ce mécanisme est décrit plus en détail dans l'étude de Ducoudré *et al.* (1993), puis a été repris dans celle de De Rosnay et Polcher (1998). Le principe de fonctionnement dit en « double bucket » est présenté en figure 2.4.

- En période de sécheresse prolongée : il n'y a qu'un seul réservoir utile dont une partie est sèche et l'autre est saturée en eau (en profondeur). Au fur et à mesure que la sécheresse se prolonge, le départ de l'eau par évapotranspiration se traduit par un amincissement de la partie saturée en eau (figure 2.4 a et b).
- Des précipitations surviennent, un réservoir superficiel est créé (figure 2.4c).
- Si une période de déficit pluviométrique (évapotranspiration supérieure aux précipitations) se produit de nouveau, une couche sèche apparaît dans le réservoir superficiel (figure 2.4d). Si cette période sèche perdure, le réservoir superficiel s'assèche complètement et disparaît, il y a plus qu'un seul réservoir (premier cas). Sinon, le réservoir superficiel continue d'être alimenté par les précipitations. Sa hauteur totale (partie sèche et saturée) n'est donc pas constante dans le temps.

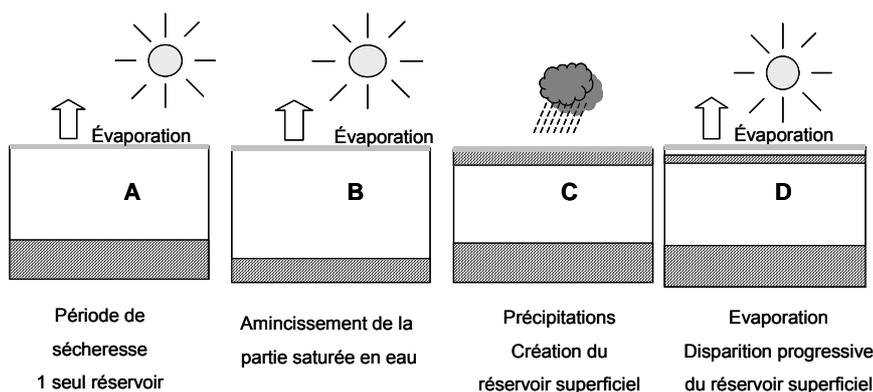


Figure 2.4 : Principe du modèle d'hydrologie du sol à deux couches de Choissnel (1977). Les parties hachurées symbolisent les portions de sol à la capacité au champ : réserve utile  $150 \text{ mm.m}^{-1}$ .

### b) Le profil racinaire et l'indice de stress hydrique

Dans ORCHIDEE, la densité de racines ( $D$ ) est constante dans le temps et décroît exponentiellement avec la profondeur ( $z$ ) :

$$D(z) = e^{-cz} \quad (2.26)$$

Le coefficient ( $c$ ), défini pour chaque PFT, est fixé à  $4 \text{ m}^{-1}$  pour les herbacées. Pour chacune des deux couches, on calcule un indice de stress hydrique ( $U_i$ ) :

$$U_i = e^{-c \cdot h_{id}} \quad (2.27)$$

$h_{id}$  est la hauteur de sol sec,

$c$  est le coefficient précédemment défini,

$U_i$  est l'indice de stress hydrique qui est utilisé pour la photosynthèse, il est compris entre 0 (eau indisponible pour les racines : point de flétrissement) et 1 (capacité au champ). Le stress hydrique global ( $U_s$ ) se déduit :

$$U_s = \max(U_1, U_2). \quad (2.28)$$

On définit un second indice de stress hydrique ( $W_s$ ) utilisé dans le calcul des autres processus (phénologie et allocation notamment) qui se définit pour chaque couche  $i$  comme le rapport entre le volume de racines comprises dans la couche saturée en eau et le volume racinaire total.  $h_i$  est l'épaisseur totale de la couche.

$$W_i = \frac{\int_{h_{id}}^{h_i} e^{-c \cdot z} \cdot dz}{\int_0^{h_i} e^{-c \cdot z} \cdot dz} \quad (2.29)$$

La forme du profil racinaire d'ORCHIDEE ne varie pas dans le temps. Il y a donc une incohérence entre la biomasse racinaire et le profil racinaire pour l'hydrologie. Cette incohérence est d'autant plus préoccupante pour les cultures car, comme déjà évoqué pour l'allocation, les racines d'une culture ne sont présentes dans le sol en permanence, et leur abondance suit le cycle saisonnier de la culture. Le labour détruit les racines et modifie aussi la forme du profil racinaire en ameublissant le sol, ce qui favorise le développement des racines dans la couche labourée (jusqu'à 20 cm de profondeur généralement). La densité racinaire reste optimale pour l'absorption d'eau et d'azote (et ne décroît pas avec la profondeur) dans l'ensemble de la couche labourée.

Au-delà de la profondeur de labour, la densité racinaire décroît avec la profondeur. Nous tenterons de prendre en compte ces particularités au chapitre 3.

### 2.3 Le développement récent des modèles agronomiques

L'importance des cultures comme ressource alimentaire explique qu'elles aient fait l'objet de très nombreuses études depuis plusieurs siècles dans le but d'augmenter les rendements (Du Monceau, 1761). Au cours des trente dernières années, le développement important des moyens informatiques a permis aux agronomes de modéliser la croissance des plantes cultivées. Brisson et Wery (2002) distinguent quatre familles de modèles (figure 2.5):

1) Les modèles **éco-physiologiques** reposent sur les travaux de De Wit *et al.* (1970) sur la photosynthèse et la respiration. Le modèle SUCROS et ses dérivés ultérieurs ont été développés aux Pays-Bas par De Wit (1978). Les modèles anglais ARCWHEAT (Weir *et al.*, 1984) et hollandais WOFOST (Van Depen *et al.*, 1989) appartiennent également à cette catégorie. Ce sont des modèles à dominante mécaniste, conçus à des fins souvent didactiques. Ces modèles simulaient initialement le cycle du carbone (productivité primaire, respiration) et sont devenus plus complets comme WOFOST où les principaux processus (photosynthèse, respiration, décomposition, bilan d'énergie, bilan hydrique) sont simulés au pas de temps journalier.

2) Les modèles **agronomiques** proprement dits sont apparus en parallèle, avec pour objectif premier de simuler les rendements. Les agronomes américains ont produit la famille des modèles CERES et ont introduit les pratiques culturales avec CERES-blé (Ritchie and Omer, 1984) et CERES-maïs (Jones and Kiniry, 1986). C'est aussi le cas du modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998a).

3) Les modèles **agro-environnementaux** simulent les rendements et certains impacts sur l'environnement, en particulier, le problème des rejets de nitrates dans les nappes phréatiques et les rivières. Les modèles EPIC (Williams *et al.*, 1984), CERES-EGC (Gabrielle *et al.*, 1995) sont des modèles agro-environnementaux.

4) Les modèles uniquement **environnementaux** comme DAISY (Hansen *et al.*, 1990) ou bien PASTIS (Lafolie, 1991) sont apparus au début des années 1990. À la différence des deux familles précédentes, le but de ces modèles est essentiellement l'étude des transferts de matières dans l'environnement (migration, lixivation, minéralisation et transport des nitrates et autres polluants...) de l'échelle de la parcelle à celle du bassin-versant.

La première famille de modèles est à dominante mécaniste, les trois autres familles de modèles ont un fonctionnement plus empirique dont l'objectif est de rendre compte des rendements ou des transferts de polluants. De nombreux modèles de cultures sont apparus depuis le début des années 1980 mais, chacun d'entre eux a été le plus souvent élaboré dans le but de répondre à un problème particulier pour un type de culture donné. La nécessité d'outils plus génériques est alors apparue. EPIC est le premier modèle de culture générique ; d'autres ont ensuite été développés comme WOFOST et STICS.

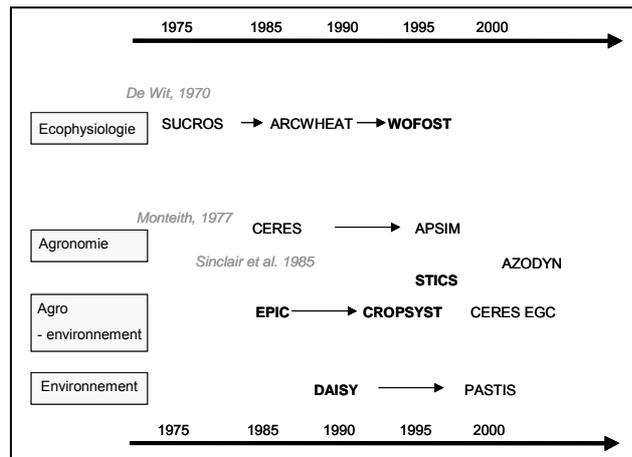


Figure 2.5 : Historique des modèles agronomiques sur les trente dernières années, d'après Brisson et Wery (2002) : en italique, les trois principales publications sur lesquelles est établi le développement des modèles ; en gras, les modèles génériques. On distingue trois lignes principales de développement :

- les modèles éco-physiologiques, les plus mécanistes et les plus précoces, réalisés à des fins didactiques ;
- les modèles agronomiques les plus nombreux aujourd'hui, sont apparus ensuite, leur objectif premier étant de prédire les rendements ;
- plus récemment, la prise de conscience de l'importance des problèmes environnementaux a motivé le développement de modèles environnementaux ou agro-environnementaux.

## 2.4 Le modèle STICS (Simulateur MULTIdisciplinaire des Cultures Standards)

STICS (Brisson *et al.*, 1998a, 2002a, 2002b) est un modèle de croissance de culture dont l'objectif est de simuler les productions agricoles (quantité, qualité), ainsi que l'évolution de l'environnement de la culture (contenu en eau et azote du sol) sous l'effet de la culture. Les caractéristiques du système sol-plante sont calculées comme la biomasse aérienne, l'indice foliaire, la répartition de l'azote entre les différents réservoirs, le nombre de grains, les bilans de l'eau et de l'azote, le profil de densité racinaire...).

Initialement prévu pour le blé et le maïs, STICS a été ensuite étendu aux principales cultures européennes (tomate, soja, luzerne, vigne...) en s'appuyant sur de nombreux travaux agronomiques, comme par exemple, les études de Bertin (1995) sur la tomate. Certaines cultures tropicales comme la canne à sucre (Smith, 2001) ou bien la banane (Brisson, 1998d) sont aussi intégrées. Pour le blé et le maïs, ce sont les variétés les plus employées qui sont traitées. C'est un modèle générique, qui utilise beaucoup de paramétrisations communes aux différentes espèces. Les cultures en rang (vergers, vignes) où la distribution du rayonnement dépend de l'orientation sont simulées. Les cultures indéterminées (tomate) sont traitées avec certains formalismes spécifiques. En effet, la compétition trophique entre les feuilles et les fruits conditionne largement la production de la culture et sa conduite. Autrement dit, les phases de croissance foliaire et de remplissage des grains se chevauchent de manière importante. Les autres cultures sont dites déterminées comme le blé, le maïs et les variétés les plus courantes de soja.

Pour nos applications à l'échelle de l'Europe, nous considérerons STICS comme générique. Certains paramètres sont propres aux espèces et aux variétés (somme des degrés-jours entre les stades phénologiques et de remplissage des grains, température minimale-seuil, ...) différent, de même que les pratiques agricoles (date de semis ou de plantation, calendrier d'irrigation, de fertilisation et de labour). STICS est composé de sept principaux modules : trois pour la partie aérienne de la plante (LAI, biomasse, rendement), trois pour le sol (bilan hydrique, bilan azoté, croissance racinaire) et un pour les transferts d'eau et de nutriments entre le sol et les parties aériennes à travers les racines. Le schéma de fonctionnement de STICS est présenté sur la figure 2.6. Nous décrivons uniquement les formulations concernant le blé, le maïs et le soja, et plus particulièrement le calcul des variables qui seront assimilées dans ORCHIDEE au chapitre 3, soit le LAI, la hauteur de végétation, le profil racinaire et le stress azoté.

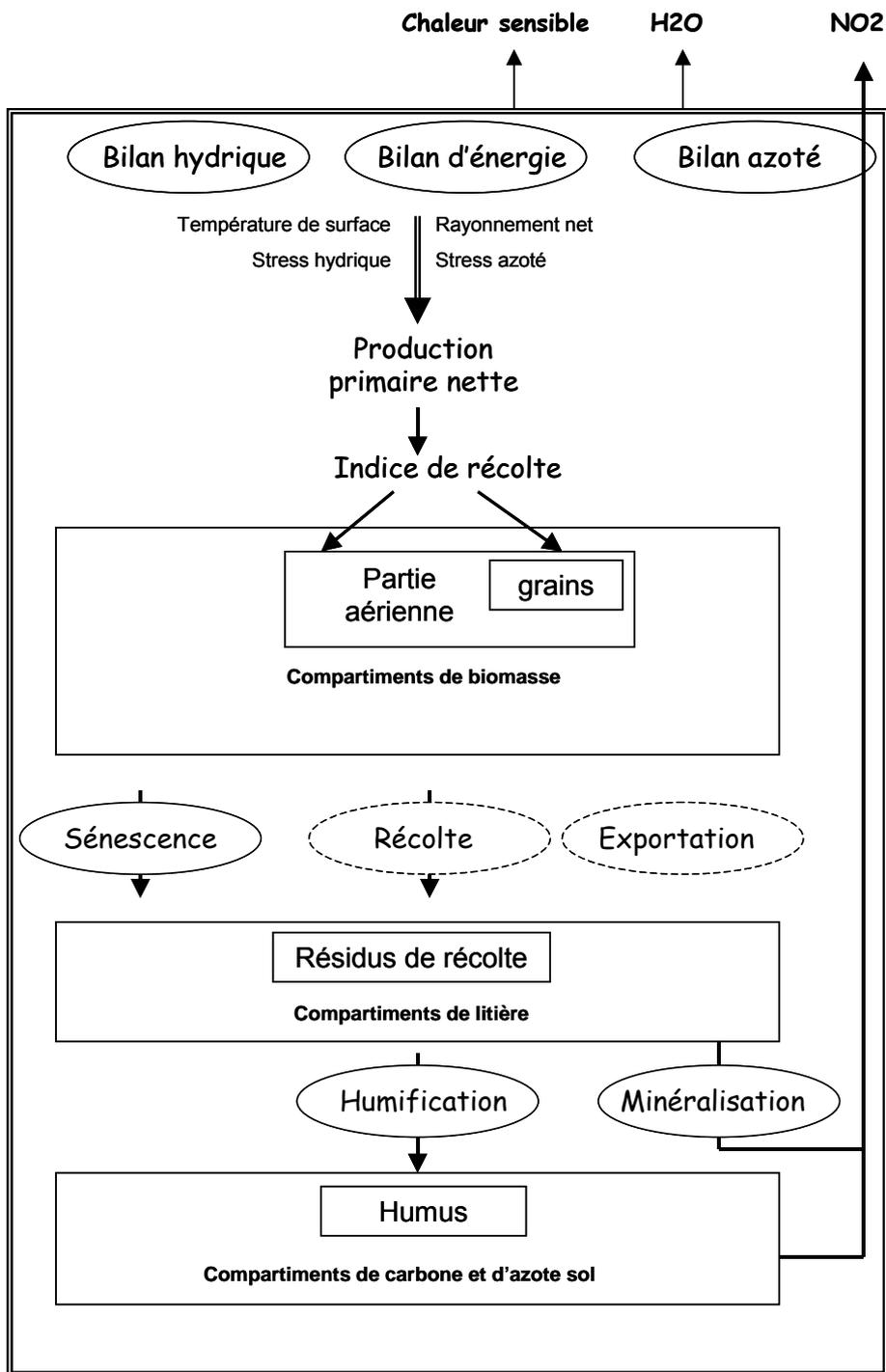


Figure 2.6 : Schéma de fonctionnement du modèle STICS.

Les flèches en traits simples symbolisent les flux de matière (carbone) ; les flèches à double trait représentent les variables échangées ; les ellipses représentent les principaux processus. Les ellipses en tiretés symbolisent les actions anthropiques.

## 2.4.1 La croissance foliaire

### a) Le calcul des dates des stades de l'indice foliaire

Dans STICS, le cycle saisonnier du LAI est découpé en sept stades (figure 2.7). Les dates de chacun des stades sont estimées de la manière suivante :

- La date de semis (SEM), prescrite, est le point de départ du cycle. En France, le blé d'hiver est semé au mois d'octobre, et le maïs, fin avril.
- La germination (GER) est déclenchée lorsque la somme des températures du sol à la profondeur du semis dépasse un seuil prescrit. L'état hydrique du sol doit également permettre la germination. La germination n'a pas lieu tant que ces conditions ne sont pas réunies. En moyenne, la germination a lieu trois ou quatre jours après le semis.
- La levée (LEV) est fonction de la profondeur de semis (prescrite) et de la longueur de la plantule sous terre. La levée intervient quand la longueur de la plantule dépasse la profondeur de semis. La longueur de la plantule dépend de la somme des températures du sol à la profondeur du semis, calculées depuis la germination, ainsi que de paramètres propres à l'espèce.
- La fin du stade juvénile (AMF) intervient quand le paramètre-unité de développement ( $U_L$ ) atteint 2.2. Son calcul est détaillé à la page suivante. Ce stade symbolise un changement dans l'évolution de la vitesse de croissance de la plante avec le temps : d'exponentielle elle devient linéaire.
- Le stade où l'indice foliaire est maximum (LAX) intervient lorsque  $U_L$  atteint 3.
- Les deux derniers stades (SEN et LAN, respectivement début de la sénescence et fin de cycle) interviennent quand la somme de températures (en degrés.jours) depuis le stade LAX, atteint le seuil prescrit pour chaque espèce.

Pour le blé, la somme des températures calculée est pondérée par des fonctions de stress (besoins en vernalisation et en photopériode éventuellement, non complètement satisfaits). Si ces besoins ne sont pas entièrement remplis, les stades seront déclenchés plus tardivement.

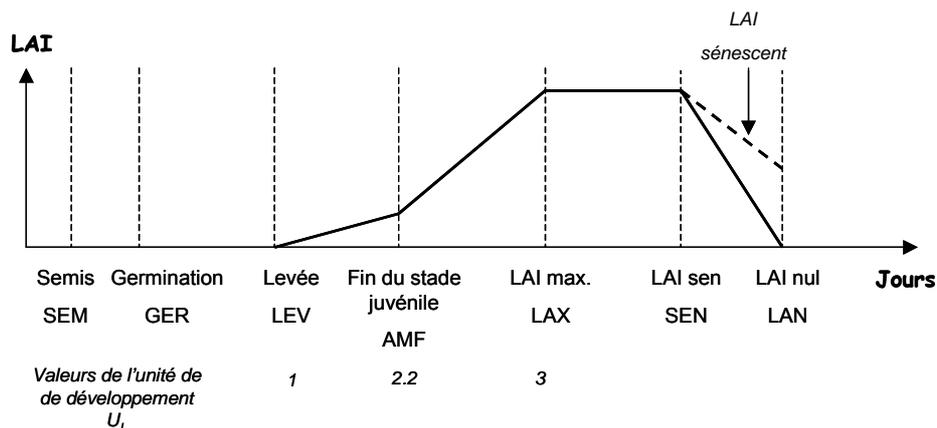


Figure 2.7 : Les sept stades du cycle saisonnier de l'indice foliaire simulé par STICS (d'après Brisson et al., 1998b, modifié). Il s'agit du LAI photosynthétiquement actif que nous nommerons par convention « LAI » dans la suite de la thèse. Pour le calcul de la hauteur du couvert intervient le LAI sénescant (courbe en pointillé).

b) Le calcul du LAI

Le calcul du LAI entre les stades LEV et LAX se fait en deux étapes :

(1) On calcule tout d'abord l'unité de développement foliaire  $U_L$  qui évolue sur la période de croissance entre 1 à la levée, 2.2 à la fin du stade juvénile et 3 au stade LAX. Son calcul se fait de la manière suivante :

$$U_L = R + V_x \cdot \frac{S_r}{S_t} \cdot V \cdot P \quad (2.29)$$

$V_x$  est la vitesse de croissance en unité de développement ;

$S_r$  est la somme de températures atteintes depuis le stade précédent ;

$S_x$  est la somme des températures requises entre les deux stades ;

R est une constante  $R = 1$  entre les stades LEV et AMF et  $R = 2.2$  entre les stades AMF et LAX.

V est fonction de la satisfaction des besoins en vernalisation (compris entre 0 et 1). Le blé d'hiver a besoin d'une période froide durant l'hiver (appelée vernalisation) pour sa croissance au début du printemps (Gate, 1996). Si celle-ci a fait défaut, la croissance du blé peut être ralentie.

P est fonction de la satisfaction des besoins en photopériode (compris en 0 et 1). L'augmentation de la photopériode (qui correspond à la durée du jour) est en partie responsable du démarrage de la croissance du blé en février-mars.

(2) On calcule ensuite la vitesse de croissance journalière du LAI :

$$\frac{dLAI}{dt} = \frac{dLAI_{max}}{dt} \cdot \frac{1}{1 + e^{5.5 \cdot (2.2 - U_L)}} \cdot (T_{cult} - T_{min}) \cdot \min(W_s, N_s) \cdot D \cdot E_f \quad (2.30)$$

$\frac{dLAI_{max}}{dt}$  (en  $m^2 \cdot m^{-2} \cdot j^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ) est la valeur maximale prescrite de la vitesse croissance, et dépend

de l'espèce ( $1.38 \cdot 10^{-2} m^2 \cdot m^{-2} \cdot j^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$  pour le maïs) ;

$U_L$  (sans unité) est l'unité de développement foliaire (précédemment décrite) ;

$T_{cult}$  (en degrés) est la température de culture calculée par STICS ;

$T_{min}$  (en degrés) est la température-seuil minimale utilisée pour le calcul de la somme des températures ;

$W_s$  et  $N_s$  (sans unité) sont des fonctions de stress hydriques et azoté, comprises chacune entre 0 et 1 ;

D (en plants. $m^{-2}$ ) est la densité de semis (prescrite) ;

$E_f$  (sans unité) est une fonction de compétition entre les plants. Au-dessous d'un seuil prescrit ( $B_{dens}$ ), il n'y a pas de compétition entre les plants, sinon :

$$E_f = \left( \frac{D}{B_{dens}} \right)^{A_{dens}} \text{ où } A_{dens} \text{ est une constante spécifique à l'espèce.} \quad (2.31)$$

### c) Le calcul de la hauteur du couvert

La hauteur du couvert (H) est déduite du LAI et vaut :

$$H = H_{\max} * [1 - \exp(-K_h * (LAI + LAI_s))] + H_0 \quad (2.32)$$

$H_{\max}$  est la hauteur maximum prescrite (en centimètres)

$K_h$  est une constante définie pour chaque espèce

$LAI_s$  est le LAI sénescent.

$H_0$  est la hauteur minimale du couvert, elle est nulle pour le blé et le maïs.

### 2.4.2 La croissance racinaire

Le profil racinaire simulé par STICS est fonction des ressources en eau et en azote. Dans les premiers centimètres sous la surface, les racines sont très abondantes mais leur efficacité (ramenée par unité de longueur) est moins forte. La densité des racines superficielles est bornée à  $0.5 \text{ cm.cm}^{-3}$ . La première étape est le calcul de la profondeur du front d'enracinement ( $Z_{\max}$ ). À chaque valeur de  $Z_{\max}$  correspond un profil de densité racinaire efficace (figure 2.8). La densité racinaire évolue en fonction de la profondeur Z. On définit tout d'abord une densité racinaire vraie :

$$L_{\text{rac}}(Z) = \frac{L_{\text{opt}}}{1 + e^{-S(Z-Z_d)}} \quad (2.33)$$

S est un paramètre intermédiaire de calcul égal à  $\frac{-4.6}{Z_l - Z_p}$  (2.34)

$L_{\text{opt}}$  est la densité racinaire optimale, prescrite à  $0.5 \text{ cm.cm}^{-3}$  ;

$Z_d$  est la valeur-seuil représentant une extraction en surface de 20% de l'eau disponible dans la zone racinaire :

$$Z_d = 0.282 \cdot (Z_p - Z_l) \quad (2.35)$$

$Z_l$  est la profondeur de labour (en cm) ;

$Z_p$  est la profondeur de l'absorption racinaire réduite de moitié par rapport à celle qui est au voisinage de la surface. Les racines arrêtent leur croissance au stade LAX.

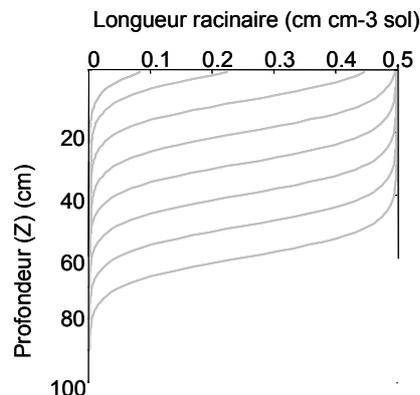


Figure 2.8 : Profils de densité racinaire correspondant à différentes valeurs du front d'enracinement ( $Z_{\max}$ ), d'après Brisson et al. (1998a)

### 2.4.3 Le bilan de l'azote et stress azoté

La dynamique de l'azote est régie par deux processus :

- La minéralisation de l'humus et des résidus de la culture (litière) auxquels s'ajoutent d'éventuels apports organiques externes. C'est la transformation de l'azote organique en azote minéral (nitrates), assimilable par la plante. La minéralisation de l'humus dépend du stock d'azote humifié, de la texture, de la température et de l'humidité du sol.
- L'absorption de l'azote par la plante dépend :
  - de l'offre du sol calculée pour chaque horizon d'un centimètre d'épaisseur à partir :
    - ✓ de la quantité d'azote dans le sol, qui est fonction des apports d'engrais (minéraux, organiques), ainsi que des résidus des fertilisants de la saison de culture précédente ;
    - ✓ de l'humidité du sol : la présence d'eau est indispensable pour transporter les nitrates jusqu'aux racines ;
    - ✓ de la densité racinaire, qui devient un facteur limitant si elle est faible.
  - de la demande de la culture qui est fonction essentiellement de la vitesse de croissance de la plante.

Un indice de nutrition azoté (INN) est calculé comme le rapport entre la concentration en azote dans la plante et celle qui correspond à la satisfaction des besoins. L'INN est compris entre 0 (cas limite où l'azote est totalement indisponible) et 1 (où l'offre est égale ou supérieure à la demande). L'indice de nutrition azoté joue sur les différents processus de croissance et sur l'élaboration du rendement. Il est important de signaler que sans apports fixés de fertilisants azotés, STICS calcule le calendrier des fertilisations de manière optimale. Dès que l'indice de nutrition azoté descend en dessous d'un certain seuil prescrit, STICS ajoute une fertilisation (fixée à 40 kgN.ha<sup>-1</sup>). Le fait de choisir le seuil de stress désiré permet de choisir le niveau d'optimisation de la conduite de la culture. Dans la suite de la thèse, nous nommerons de manière abusive « stress azoté » l'indice de nutrition azoté.

## 2.5 Conclusion

La description des deux modèles montre une complémentarité intéressante. Dans la suite du travail, nous tenterons de mettre au maximum à profit les compétences des deux modèles. ORCHIDEE est indiqué pour des études à grande échelle, car il peut intégrer les principaux types de couvert et son pas de temps court permet de simuler le cycle diurne des flux de surface, et être ainsi compatible avec un MCGA (tableau 2.3). Le forçage d'ORCHIDEE est uniquement climatique et pédologique, or, le développement d'une culture est très influencé par les pratiques culturales. STICS a été spécialement développé pour représenter de manière réaliste le développement des cultures et leur productivité, et intègre les pratiques agricoles. Un autre avantage de STICS est qu'il calcule le bilan de l'azote, et peut reproduire le développement des cultures sous différentes conditions de nutrition azotée. STICS ne peut toutefois pas se substituer à ORCHIDEE : son pas de temps journalier ne permet pas de couplage avec un MCGA. D'autre part, le contenu du carbone du sol n'est pas calculé, ce qui rend impossible des simulations-

scénarios dans le cadre de l'augmentation des gaz à effet de serre et du réchauffement climatique, comme nous l'envisageons au chapitre 5. De plus, STICS a été conçu pour des études à l'échelle d'une parcelle et ne peut intégrer différents types de couvert au sein d'une maille. Nous présenterons au chapitre 3 le couplage entre ORCHIDEE et STICS qui permet de tirer parti des avantages des deux modèles.

<b>Fonctionnalités</b>	<b>ORCHIDEE</b>	<b>STICS</b>
Spatialisation	++	∅
Couplage avec un MCGA	++	∅
Représentation des cultures	+	++
Respiration - Décomposition	++	∅
Cycle de l'azote	∅	++

*Tableau 2.3 Principaux points forts et points faibles d'ORCHIDEE et de STICS.*

*Légende : ++ point fort du modèle ; + fonctionnalité existante mais simplifiée dans le modèle ; ∅ fonctionnalité inexistante ou incompatible avec le modèle.*

## Chapitre 3. Développement et validation sur sites d'ORCHIDEE-STICS : un nouvel outil pour mieux représenter les cultures

---

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente le couplage entre les deux modèles ORCHIDEE et STICS. Nous décrivons d'abord les raisons du choix du couplage ainsi que les deux autres méthodologies possibles. Nous présenterons ensuite les étapes successives du couplage entre les deux modèles sur trois sites agricoles français (blé et maïs). Le nouveau modèle baptisé ORCHIDEE-STICS a été validé sur la biomasse aérienne, l'indice foliaire, le flux net de carbone et l'évapotranspiration. L'ensemble de ce travail fait l'objet d'une publication sous presse dans la revue « *Earth Interactions* », qui est incluse dans ce chapitre. Deux analyses supplémentaires, qui ne figurent pas dans la publication, sont présentées en fin de chapitre. Il s'agit de l'évaluation de l'efficacité de conversion et du stock de carbone du sol simulés à l'échelle locale.

### 3.2 Calibration et validation sur sites du modèle ORCHIDEE – STICS

#### 3.2.1 Choix de la méthodologie du couplage

Trois possibilités sont envisageables pour améliorer la prise en compte des zones cultivées dans un modèle global. On peut soit :

- **développer** de nouvelles paramétrisations dans ORCHIDEE, propres aux cultures, en s'appuyant sur les nombreuses études de modélisation agronomique. L'avantage de cette méthode est de disposer d'un outil intégré avec le moins d'incohérences et de divergences possibles tout en restant mécaniste. L'inconvénient principal de cette méthodologie est qu'il sera fastidieux d'intégrer au fur et à mesure les améliorations continuellement apportées aux modèles agronomiques comme STICS. L'évolution des modèles agronomiques reflète l'évolution des pratiques culturales.

- **utiliser** le modèle agronomique seul sur les zones agricoles à la place d'ORCHIDEE, celui-ci continuant de fonctionner sur les zones « naturelles ». L'avantage de cette méthode est d'utiliser un modèle agronomique qui a été validé sur de nombreuses cultures. STICS est en effet le résultat du travail d'une centaine de chercheurs de l'INRA et du CIRAD sur une dizaine d'année (STICS, 2003), il est intéressant de mettre à profit cet acquis de compétences pour notre étude. Le couplage respecte l'individualité de chaque modèle et conserve leurs possibilités respectives de développement ultérieur. En effet, STICS est en perpétuelle évolution (variétés utilisées, pratiques culturales). Cette approche pose problème dans la perspective de couplage à un MCGA. En effet, STICS fonctionne avec un pas de temps journalier, or, dans un couplage à un MCGA, il est nécessaire de simuler le cycle diurne des flux échangés entre la surface et l'atmosphère. De plus, STICS ne simule pas la respiration ; en conséquence, le flux net de carbone n'est pas calculé. Enfin, les bilans d'énergie et hydrique sont calculés d'une manière différente dans les deux modèles. Aussi, cette approche ne permet pas de conserver la cohérence des

réserves en eau, ainsi que des stocks de carbone du sol entre végétation agricole et végétation naturelle au sein d'une même maille. Cette cohérence est nécessaire si l'on souhaite quantifier l'évolution des stocks de carbone dans le cas d'une succession de types de végétation, comme par exemple, le passage d'une végétation naturelle à une végétation agricole (ou vice versa).

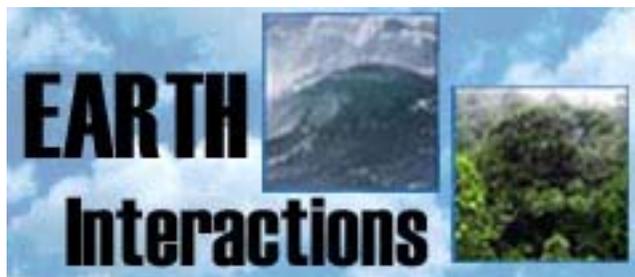
- **interfacer** ORCHIDEE avec STICS. Les avantages sont les mêmes que ceux de la méthodologie précédente, cette approche a l'avantage supplémentaire d'être compatible avec un MCGA. **C'est l'approche que nous avons finalement retenue.**

### 3.2.2 Présentation du « couplage » entre ORCHIDEE et STICS

Il y a une demande croissante au niveau international pour quantifier, à différentes échelles spatiales (de régionale à globale), les puits et les sources de carbone ainsi que les contenus des réserves hydriques du sol. Les modèles sont les outils désignés pour ces objectifs, plus particulièrement les modèles globaux de biosphère qui calculent les principaux processus physiologiques, biogéochimiques et biophysiques des principaux types de végétation du monde. La représentation des zones anthropisées (comme les cultures, les prairies, les forêts gérées et les zones urbanisées) est simplifiée dans ces modèles ; ceux-ci étaient initialement conçus pour simuler les écosystèmes naturels, qui sont de plus fortement modifiés par l'homme. En Europe, les cultures occupent environ 35% de la superficie, et les prairies entre 30 et 40%, alors qu'autrefois l'ensemble du territoire était occupé par des forêts naturelles. L'objectif premier de cette publication est de développer une méthodologie qui permet de tirer parti au mieux d'un modèle global de dynamique de la végétation (ORCHIDEE) et d'un modèle agronomique générique (STICS) afin d'améliorer la simulation des flux de vapeur d'eau et de CO<sub>2</sub> échangés entre la surface et l'atmosphère au-dessus des zones agricoles, ainsi que les bilans d'eau et de carbone. Les variables qui sont calculées de manière plus réaliste par STICS (l'indice foliaire, le profil de densité racinaire, le stress azoté et la hauteur de végétation) sont assimilées dans ORCHIDEE. ORCHIDEE continue de calculer son propre bilan d'eau et de carbone à partir des flux simulés au pas de temps de la demi-heure. L'allocation des produits de la photosynthèse a été modifiée pour maintenir la cohérence entre l'indice foliaire et la biomasse des feuilles, et celle entre la densité racinaire et la biomasse des racines. Le stress hydrique est calculé en utilisant aussi le profil racinaire issu de STICS. Les vitesses maximales de carboxylation et de régénération du RuBP ont été ajustées sur des valeurs plus réalistes ; ces valeurs peuvent être diminuées en cas de carence azotée. Enfin, nous avons inclus la récolte et exporté la biomasse des grains d'ORCHIDEE. Nous montrons, étape par étape, l'impact de chaque modification sur les flux et la biomasse sur trois sites agricoles (deux de blé et un de maïs). Nous validons ORCHIDEE-STICS sur les flux d'eau et de carbone sur deux sites agricoles du projet Ameriflux.

**3.3 Article publié dans « *Earth Interactions* » : *Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites.***

*Sébastien Gervois, Nathalie de Noblet-Ducoudré, Nicolas Viovy, Philippe Ciais, Nadine Brisson, Bernard Seguin, Alain Perrier*



Copyright © 2004, Paper 8-016; 8,004 words, 10 Figures, 0 Animations, 5 Tables.  
<http://EarthInteractions.org>

## Including Croplands in a Global Biosphere Model: Methodology and Evaluation at Specific Sites

**Sébastien Gervois, Nathalie de Noblet-Ducoudré,\* Nicolas Viovy, and Philippe Ciais**

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette, France

**Nadine Brisson and Bernard Seguin**

INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, Avignon, France

**Alain Perrier**

INAPG, Département AGER, Paris, France

Received 8 October 2003; accepted 3 February 2004

**ABSTRACT:** There is a strong international demand for quantitative estimates of both carbon sources/sinks, and water availability at the land surface at various spatial scales (regional to global). These estimates can be derived (and usually are) from global biosphere models, which simulate physiological, biogeochemical, and biophysical processes, using a variety of plant functional types. Now, the representation of the large area covered with managed land (e.g., croplands, grasslands) is still rather basic in these models, which were first designed to simulate natural ecosystems, while more and more

---

\* Corresponding author address: Nathalie de Noblet-Ducoudré, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement Unité mixte CEA-CNRS, Bât 701 Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette cédex, France.

E-mail address: [Nathalie.De-Noblet@cea.fr](mailto:Nathalie.De-Noblet@cea.fr)

land is heavily disturbed by man (crops cover ~35% and grasslands ~30%–40% of western Europe's area as a result of massive deforestation mainly in the Middle Ages).

In this paper a methodology is presented that combines the use of a dynamic global vegetation model (DGVM) known as Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE) and a generic crop model [the Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures Standard (STICS)]. This association aims at improving the simulation of water vapor and CO<sub>2</sub> fluxes at the land–atmosphere interface over croplands, and thereby the calculation of the carbon and water budget. Variables that are much better computed in STICS (e.g., leaf area index, root density profile, nitrogen stress, vegetation height) are assimilated daily into ORCHIDEE, which continues to compute its own carbon and water balance from the fluxes simulated at the half-hourly time step. The allocation of photosynthates in ORCHIDEE was modified in order to maintain the coherence between leaf area index and leaf biomass, as well as between root density and root biomass. Soil moisture stress is computed using a more realistic root density profile. The maximum rates of carboxylation and RuBP (ribulosebiphosphate) regeneration were adjusted to more realistic values, while the actual rates can now be reduced following the nitrogen stress. Finally, harvest has been implemented into ORCHIDEE.

The improved model (ORCHIDEE-STICS) is evaluated against measurements of total aboveground biomass, evapotranspiration, and net CO<sub>2</sub> flux at four different sites covered with either winter wheat or corn.

**KEYWORDS:** Global biosphere model; Ecosystems: managed and natural; Water, carbon, and energy budget

## 1. Introduction

Human activities have been transforming the natural landscape for thousands of years (Vitousek et al. 1997) and will most probably continue to transform it (Alcamo et al. 1998). This has had, and will have, many impacts, including effects on regional and global climates. Many modeling studies of the interactions between climate and vegetation compared disturbed lands with natural vegetation, mostly in the Tropics where forests were, and are still, being converted into croplands or grasslands (e.g., Nobre et al. 1991; Xue and Shukla 1993; Polcher et al. 1996). These numerical experiments showed large regional impacts on the water cycle, including local inflow of atmospheric water vapor. More recently, modelers focused on the temperate zone. For instance, Betts (Betts 1999) simulated cooler European summers as a result of increased surface albedo, while Zhao et al. (Zhao et al. 2001) obtained warmer summers due to decreased evapotranspiration. Over western Europe, de Noblet-Ducoudré (2005) simulated milder and wetter winters, and cooler summers, caused by both increased albedo and greater evapotranspiration rates when comparing present-day land cover with potential vegetation distribution (e.g., before the large deforestation of the Middle Ages). These modeling studies all agree that land-cover changes can have a significant impact on regional (and possibly global) climates, although their results differ quantitatively, and sometimes qualitatively. Interestingly, in all cases croplands were simply

treated as “modified grasslands” because, up to now, crop models able to represent agroecosystems in a realistic way have only been designed and used for specific predictions and analyses at the site or field level and their integration in global models had not been considered.

Another rather large set of studies, using empirical models, has also shown the potential impacts of croplands on the carbon budget. Apart from the well-known release of carbon dioxide occurring when pristine forests are being replaced by crops, the role of croplands (supply of carbon to or removal from the atmosphere) is yet highly uncertain and depends on the management mode (Smith et al. 2000). Vleeshouwers and Verhagen (Vleeshouwers and Verhagen 2002) showed that European croplands act as a carbon source of about  $0.84 \text{ TC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  but with very large uncertainties (Janssens et al. 2003). This is in agreement with more and more evidence of lower soil carbon content under cultivated areas than in natural ecosystems (Arrouays et al. 2002).

At the global scale, we know from more recent studies (Dufresne et al. 2002; Friedlingstein et al. 2003; Cox et al. 2000) that land surfaces may not be able to absorb in the next century as much  $\text{CO}_2$  as they do now due to the expected warming and therefore may not compensate much for the future increase in anthropogenic emissions of carbon dioxide. These pioneer experiments have not considered a potential changing landscape, neither have they included a realistic representation of present-day functioning of croplands, which may even exacerbate the negative feedbacks they have highlighted.

All these considerations, together with the known poor representation of crops and pastures in most biogeochemical and soil–vegetation–atmosphere transfer global models, justify any work trying to improve the description of these ecosystems in global biosphere models.

Global biosphere models encapsulate natural biogeochemical and biophysical processes in order to simulate important ecosystems processes (e.g., photosynthesis, respiration, and allocation) at a large spatial scale, and are often designed to be coupled with atmospheric general circulation models. Such global spatially explicit models generally have only few plant functional types, and they treat croplands in a crude manner. Because land managers strictly control the development of plants in agroecosystems by means of fertilization and irrigation calendars, and choice of sowing date, the ecosystem can no longer be treated as being governed only by natural processes.

Crops, being the major source of food and fibers, have been studied for a long time in order to increase yield (e.g., du Monceau 1761), and agronomists have designed and applied plant growth models over the last 30 yr for that purpose (de Wit 1978; Ritchie and Omer 1984; Jones and Kiniry 1986). There are as many models as crop types, each generally having been calibrated for one crop family only. However, generic crop models have recently been developed: DAISY (Danish Simulation Model; Hansen et al. 1990), the Explicit Planetary Isentropic Coordinate model (EPIC; Williams et al. 1984), the World Food Study model (WOFOST; van Deipen et al. 1989), and the Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures Standard (STICS; Brisson et al. 1998).

In this paper we focus on one global ecosystem model [Organizing Carbon and

Hydrology in Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE)] and one crop model (STICS). ORCHIDEE has been developed by Krinner et al. (2005), is coupled to the Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)<sup>1</sup> atmosphere–ocean general circulation model (<http://www.ipsl.jussieu.fr/~omamce/IPSLCM4>) and will be further used in studies estimating the changes in 1) global carbon sources/sinks and 2) climate due to human-induced changes in land cover. STICS (Brisson et al. 1998) simulates the growth of several temperate crop types (e.g., wheat, corn, and soybean) and is also being extended to tropical crops (e.g., bananas) that may be important for the potential use of the model in global studies.

Our objective is to improve the simulation of fluxes by ORCHIDEE at the surface–atmosphere interface over croplands and to allow further studies of the simultaneous interactions between climate, land management, and crop growth. Section 2 shows why natural grass plant functional types (PFTs) cannot be used, in global ecosystem models, as a substitute for crops. Section 3 describes the models and the methodology chosen for “coupling.” Section 4 shows results of our coupled model at a number of specific sites covered with either winter wheat or corn. Conclusions are drawn in section 5.

## **2. Why crops cannot be further simulated in a DGVM with natural grass PFTs as a substitution**

Until now, crops are parameterized as natural grasslands in global ecosystem models (as in ORCHIDEE), albeit with modifications of some parameters. Examination of the simulated leaf area index (LAI; i.e., leaf surface area per unit ground surface area) is a good way to evaluate the first-order response of the model since LAI is a key variable that impacts the following:

- albedo,
- roughness length,
- penetration of radiation in the canopy,
- canopy conductance,

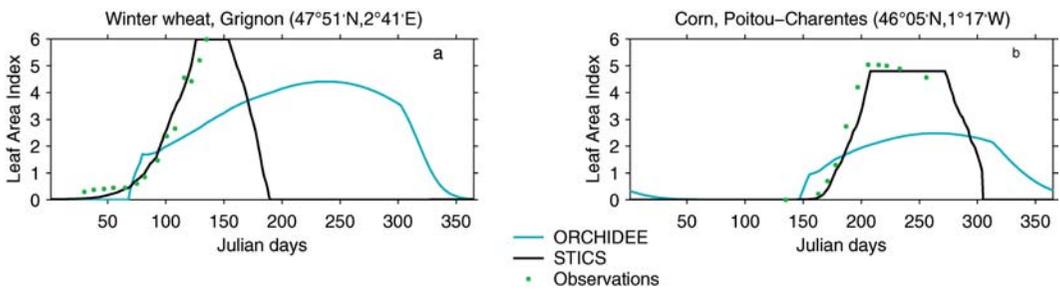
and thereby most surface fluxes (e.g., radiation, latent and sensible heat, and photosynthesis).

In its standard version (see section 3.1.) ORCHIDEE uses natural grasslands as a substitute for crops and Figure 1 compares its simulated LAI with 1) the observed and 2) the LAI simulated by the crop model STICS (described in section 3.2.), at two different sites (Table 1): a winter wheat site located near the Institut National de Recherche Agronomique (INRA) center in Grignon, France, and a corn site located in Poitou-Charentes, France.

It is rather obvious that ORCHIDEE is unable to correctly simulate the seasonality of a winter crop (Figure 1a), while STICS’s outputs match very well with the observed data. Winter wheat is usually sown in France in October–November, emerges before winter, and reaches its maximum LAI in the spring before being harvested in early summer. In ORCHIDEE, wheat is modeled as a

---

<sup>1</sup> The IPSL is a federation of research laboratories and universities that are located in and close to Paris, France (headed by Jean Jouzel).



**Figure 1.** Observed discrepancy between ORCHIDEE vs STICS and data. Temporal evolution of observed (green triangles) and simulated (plain lines) LAI starting 1 Jan (Julian day 1) and ending 31 Dec (Julian day 365). Simulated values from STICS are plotted using the black line, while results from the standard version of ORCHIDEE are plotted using the blue line. Results are shown for (a) winter wheat at Grignon in 1995, and (b) corn in Poitou-Charentes in 1996. Both sites are briefly described in Table 1.

natural C<sub>3</sub> grass (albeit with enhanced photosynthesis), hence, its growth curve more closely follows the climatic conditions as germination occurs in the spring and a maximum LAI is reached in late summer. The timing problem is not as crucial for corn (Figure 1b) as this cereal is sown in the spring and therefore emerges at the same time as a natural grass.

Moreover, not only is the maximum value of the simulated LAI greatly underestimated by ORCHIDEE, but also the simulated growing season is too long in ORCHIDEE at both sites.

Most of these differences are due to anthropogenic processes that are accounted for in STICS (implicitly or explicitly) but not in ORCHIDEE:

**Table 1.** Some characteristics of each of the four sites used in this paper for evaluation of ORCHIDEE-STICS. For LAI, biomass, evaporation, and carbon flux, the “yes” indicates that we had access to measurements, while “no” means no data were available.

Name	Year	Country	Crop type	Annual mean temperature (°C)	Longitude	Latitude	Altitude	LAI	Biomass	Evapo-transpiration	Net carbon flux
Grignon	1995	France	Winter wheat	10	47°51'N	02°41'E	120 m	Yes	Yes	No	No
Poitou-Charentes	1996	France	Corn	11.5	46°05'N	01°17'W	80 m	Yes	Yes	No	No
Bondville	1997	USA (Illinois)	Corn	11.1	40°00'N	88°17'W	300 m	Yes	No	Yes	Yes
Ponca	1997	USA (Oklahoma)	Winter wheat	16	36°45'N	97°05'W	250 m	No	No	Yes	Yes

- selection of crop cultivars drive high LAI and short seasonal cycles;
- agricultural practices applied by farmers (e.g., ploughing; choice of sowing date; frequency, type, and amount of fertilizer; irrigation; and harvest date) modulate the timing and duration of the growth cycle and crop growth amplitude.

### 3. Models and “coupling” strategy

The quick overview of the main processes simulated in each model, presented in sections 3.1. and 3.2., is followed by the detailed methodology adopted to “couple” both models.

#### 3.1. ORCHIDEE

ORCHIDEE (Krinner et al. 2005; Figure 2, upper part) is the land surface model (“carbon–water–energy”) developed at IPSL. It simulates water, CO<sub>2</sub>, and energy exchanges between vegetation and the atmosphere and can be used either coupled to the IPSL climate model or offline as it was in this study (i.e., forced with observed meteorological data). Its time step for a number of processes is 30 min, ensuring numerical stability and adequate representation of the diurnal cycle. ORCHIDEE includes three main modules.

- The Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme [Schématisation des Echanges Hydriques à l’Interface entre le Biosphère et l’Atmosphère (SECHIBA; Ducoudré et al. 1993], which interacts with the atmosphere and computes the “instantaneous” (fast, i.e., half-hourly time step) fluxes of momentum, heat, water, and CO<sub>2</sub> assimilation, the soil water budget, and the surface energy budget.
- A biogeochemical model that simulates the daily processes of carbon and vegetation dynamics (e.g., respiration, litter production and decomposition, allocation, leaf cycle).
- A module of long-term (i.e., more than 1 yr) ecosystem dynamics (i.e., evolution from one vegetation type to another), extracted from the Lund–Potsdam–Jena (LPJ) Dynamic Global Vegetation Model (DGVM; Sitch et al. 2003). In this study this module is turned off since the distribution of vegetation was always prescribed.

Surface types are grouped into 10 natural PFTs (e.g., evergreen and deciduous trees, C<sub>4</sub> and C<sub>3</sub> grass) and bare soil. Two additional PFTs, abusively named crops (C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub>), are included, but in reality they correspond to a “supergrassland” (the only differences with natural C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> grass PFTs are the prescribed higher rates of carboxylation and RuBP (ribulosebisphosphate) regeneration, so as to simulate greater productivity). PFTs can coexist within the same cell (also referred to as a mosaic vegetation). They all experience the same climate forcing but compute fluxes depending on their own properties. The fluxes are thereafter averaged before entering the first atmospheric level.

ORCHIDEE-STICS Structure

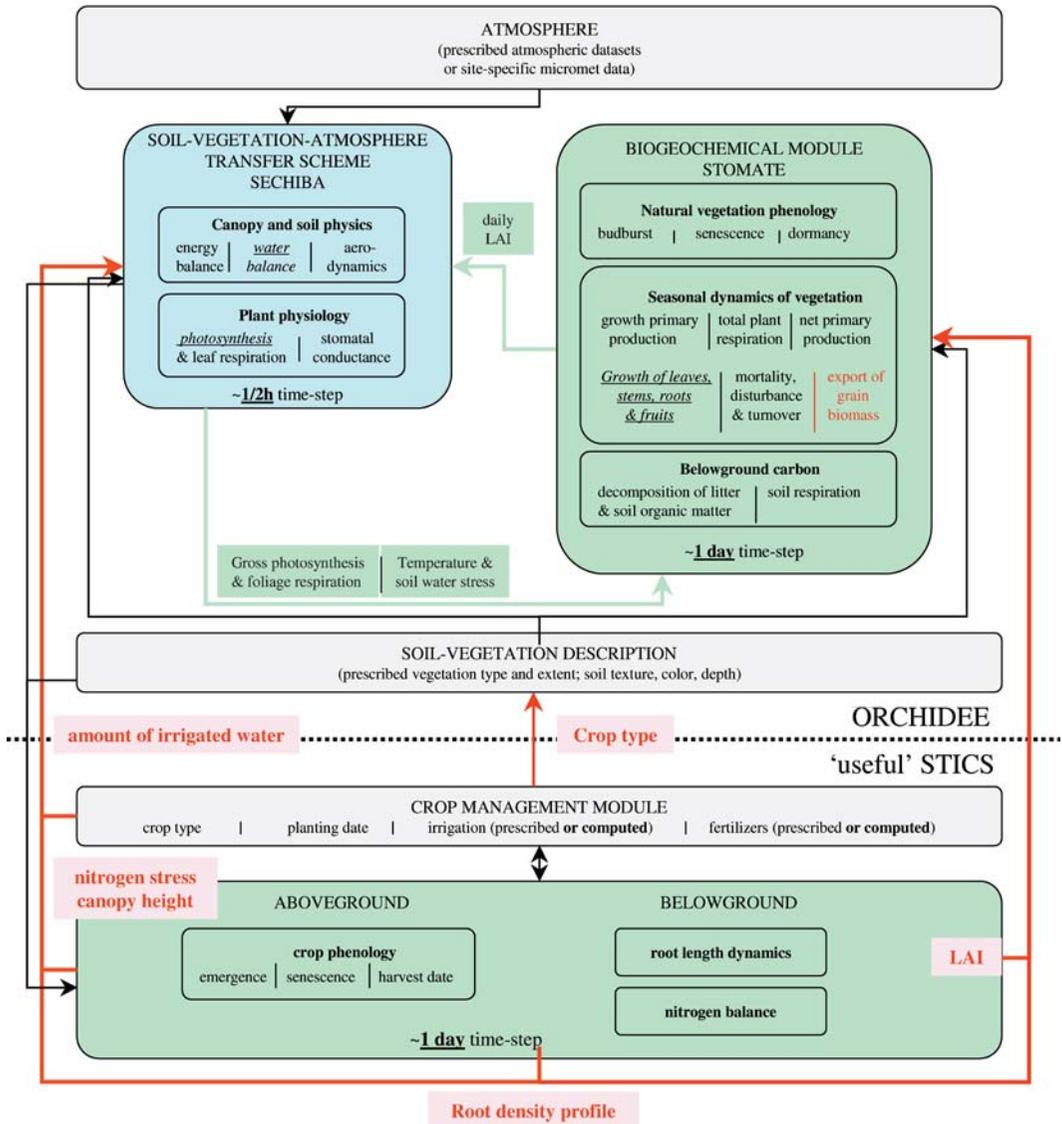


Figure 2. Schematic of ORCHIDEE-STICS, an altered version of ORCHIDEE (Krinner et al. 2005), ORCHIDEE-STICS incorporates agroecosystems using crop phenology, crop management (e.g., fertilizer application, irrigation), and nitrogen cycling. Red arrows and text indicate the variables that are simulated by STICS and assimilated in ORCHIDEE. Text in italics and underlined indicates parameterizations of ORCHIDEE that have been updated. Blue boxes refer to fast processes (time step smaller than 1 h), while green boxes refer to processes/variables computed daily. Gray boxes show prescribed variables.

### 3.2. STICS

STICS<sup>2</sup> (Brisson et al. 1998; Brisson et al. 2002a; Brisson et al. 2002b) has been developed and extensively validated as an operational tool to compute crop yield and quality, as well as environmental variables. It simulates the daily behavior of the soil–crop system (e.g., aboveground biomass and its nitrogen content, leaf area index, number of harvested grains and their biomass, soil water and nitrogen budgets, and root density profile). STICS has been applied to a variety of crops and cultivars (e.g., wheat, corn, tomato, banana, soybean, grass, and grape) with few structural changes. Some calculating modes, parameters, and management prescriptions (e.g., sowing date, amount of fertilizers, amount of irrigation) are specific to the chosen crop type (or cultivar).

STICS is divided into several modules concerning the aboveground part of the crop (i.e., leaf area index and biomass, and allocation to grains), soil water and nitrogen balance, root growth, and the transfer of water and nutrients between the soil and the aboveground biomass through the roots.

### 3.3. Assimilating outputs from STICS in ORCHIDEE

As already highlighted in section 2, STICS realistically simulates the “real crop world” despite a limited use of mechanistic modeling (of physiological and biophysical processes common to all crop models as discussed in Boote et al. 1996). Therefore, rather than implementing improved parameterizations for crops in ORCHIDEE, the strategy we have adopted is to assimilate some of STICS’s outputs in ORCHIDEE to replace the variables that are either badly simulated (e.g., LAI) or crudely prescribed (e.g., nitrogen stress and vegetation height). This will allow us to implement all useful future improvements of STICS without (or with minimum) further adjustments of ORCHIDEE.

We could have chosen to use STICS instead of ORCHIDEE over cultivated areas, but coupling with climate would not have been possible as we would have lacked short-term exchanges with the atmosphere (e.g., water, heat, momentum, CO<sub>2</sub>). Just as important, evaluation of changes in stocks of soil carbon and water at any spatial scale (regional to global) requires that these budgets be coherently simulated. This can only be done using the same modeling approach. Differences that can arise from the use of different models can indeed be as large as the ones resulting from missing feedbacks in only one model.

Each model is run simultaneously and forced with the same atmospheric conditions and surface characteristics (see Figure 2 for schematic diagram). Each day, STICS provides ORCHIDEE with values for LAI, root density profile, nitrogen stress, and vegetation height. Some parameterizations had to be updated in ORCHIDEE: 1) the computation of carbon allocation to plant compartments and leaf senescence was changed to ensure consistency between the LAI (root density profile, respectively) from STICS and the leaf biomass (root biomass, respectively) computed in ORCHIDEE (see section 3.3.); and 2) the soil moisture stress to account for the root density profile computed in STICS (see section 3.4.).

---

<sup>2</sup> In this study we have used version 4.0 of STICS.

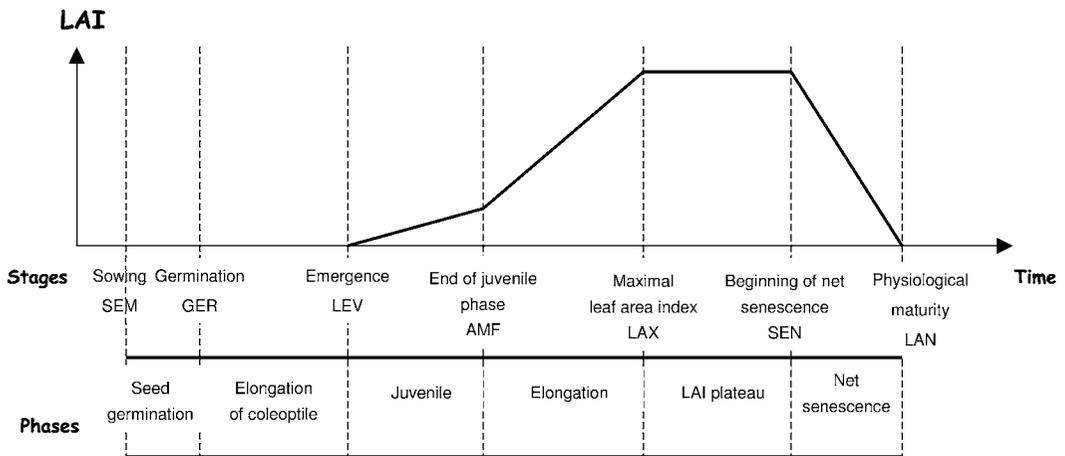


Figure 3. Theoretical temporal evolution of LAI in STICS.

### 3.3.1. Seasonal cycle of leaf area index

The temporal evolution of LAI in STICS is composed of several phases after crop emergence (Figure 3): the juvenile phase, the elongation phase (period of maximum growth), a plateau of maximum LAI (during which growth and senescence compensate for each other), and finally loss of all foliage as the rate of senescence outweighs any growth. The duration of each phase is calculated from growing degree-day sum (GDD; based on crop temperature above prescribed base temperature) weighted by limiting functions to account for photoperiodism (e.g., for wheat and soybean), and vernalization (e.g., for winter wheat). Transition between stages occurs at prescribed values of GDD sums, which are specific to each crop and cultivar (see values in Table 2 for winter wheat and corn).

Emergence depends on the number of GDDs accumulated since the sowing date computed using soil temperature at the sowing depth. Emergence will not occur if soil moisture in the seed-bed layer is below the wilting point.

LAI is, up to maturity, computed as the net balance between leaf growth and senescence. Daily growth is a logistic function of development units (corresponding to the different stages) multiplied by crop efficient temperature and stress

Table 2. Values of GDD sums used for winter wheat and corn at all sites to compute the temporal cycle of LAI (see Figure 3 for nomenclature).

Growth stages/thresholds	Winter wheat GDD above 0°C	Corn GDD above 8°C
Between sowing date and emergence	51	128
Between emergence and the end of the juvenile stage	237	405
Between the end of the juvenile stage and maximum LAI	310	403
Between maximum LAI and the start of senescence	237	744
Between the start of senescence and physiological maturity	693	309
TOTAL	1522	1989

functions related to water and nitrogen limitations. After the maximum growth period, LAI remains constant (at its maximum value) until the beginning of net senescence and is then considered to decrease linearly to zero (Brisson et al. 1998).

In STICS, growth in terms of biomass is computed independently and only influences the leaf growth in terms of surface if the inferred specific leaf area (i.e., the ratio between leaf surface area and leaf dry mass) reaches critical values.

In ORCHIDEE, the date of leaf emergence is computed from Botta et al. (Botta et al. 2000) and depends (as for STICS) on GDD sums and soil water availability. The plant then uses its carbohydrate reserve (accumulated during the previous year and corresponding to seeds for crops) to grow a minimum quantity of leaves and roots. If this carbohydrate reserve is empty, the plant will not be able to grow. Once the growing season has started, photosynthesis and respiration are computed as functions of atmospheric conditions, leaf age, and species characteristics, and photosynthetates are allocated to the different plant compartments following the formulations derived by Friedlingstein et al. (Friedlingstein et al. 1998; see section 3.3.1). LAI is finally computed daily from the amount of biomass allocated to leaves as follows:

$$\text{LAI} = \text{leaf\_biomass} \times \text{sla},$$

where sla is the specific leaf area ( $\text{m}^2 \text{gC}^{-1}$ ). A maximum value of LAI is prescribed for each plant type, above which no more biomass is allocated to leaves. Senescence occurs either when leaves reach a prescribed age or when the stress threshold related to temperature or soil water content is met.

Because the LAI displays incorrect seasonality and climax (Figure 1), we have chosen to inhibit its daily calculation in ORCHIDEE and to replace it with the one computed daily in STICS.

### 3.3.2. Photosynthesis

In ORCHIDEE,  $\text{C}_3$  photosynthesis (e.g., winter wheat) is computed from Farquhar et al. (Farquhar et al. 1980), while for  $\text{C}_4$  plants (e.g., corn) the model developed by Collatz et al. (Collatz et al. 1992) is used (photorespiration being inhibited in  $\text{C}_4$  plants). In both cases, photosynthetic rates depend on maximum rates of carboxylation ( $V_{\text{cmax}}$ ) and RuBP regeneration ( $V_{\text{jmax}}$ ), which are, respectively, set to 100 and 200  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  (for a temperature of 25°C) in the standard version of ORCHIDEE for both  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  crops. These parameters were updated in the new version of the code to  $V_{\text{cmax}} = 120$  and  $V_{\text{jmax}} = 240 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  following the data compilation of Wullschlegel (Wullschlegel 1993). Higher values (compared to natural grass PFTs) result mainly from the genetic selection of cultivars.

### 3.3.3. Allocation, senescence, and harvest

We have modified our carbon allocation procedure to reconcile the calculation of leaf biomass with the externally forced LAI. In the standard version of ORCHIDEE this has been adapted from Friedlingstein et al. [Friedlingstein et al. 1998; see Krinner et al. (2005) for further discussion] and accounts for five biomass compartments (leaves, roots, stems, reserves, and fruits). The fractions allocated to leaves, roots, and stems are parameterized as functions of soil water

content, temperature, light, and nitrogen availability (e.g., stress functions). At the end of the growing season all photosynthetates are allocated to the carbohydrate reserves (that will be used for the next season's leaf and root initial growth). Otherwise, the fraction allocated to fruits is set to 10%. As already mentioned (see section 3.3.1.), no more biomass is allocated to leaves above the maximum prescribed LAI.

To improve ORCHIDEE we included a sixth reservoir, "export," that is only filled at harvest with the sum of fruit and reserve biomass (the fruit reservoir is then immediately set to zero, while a minimum biomass is kept in the reserve for the next season's growth). Senescent stems and leaves are converted into locally decomposing litter.

The daily increment in leaf biomass ( $NPP_l$ ) is computed from the daily increment in LAI ( $dLAI/dt$ ) simulated by STICS as follows:

$$NPP_l = \frac{dLAI}{dt} \frac{1}{(sla)}.$$

Similarly, the daily increment in root biomass ( $NPP_r$ ) in the updated version of ORCHIDEE is computed from the daily increment in root length ( $d[\int_0^{z_r} L_r(z)]/dt$ ; see section 3.3.4.) simulated in STICS:

$$NPP_r = \frac{d\left[\int_0^{z_r} L_r(z)\right]}{dt} \left(\frac{1}{L_{r0}}\right),$$

where  $L_{r0}$  is the specific root length set to  $18 \times 10^3 \text{ cm gC}^{-1}$  for wheat and to  $9 \times 10^3 \text{ cm gC}^{-1}$  for corn (Gregory et al. 1997);  $L_r(z)$  is the root length as a function of depth ( $z$ ); and  $z_r$  is the root front depth simulated in STICS.

The remaining daily net primary production ( $NPP_{\text{residual}}$ ), once  $NPP_l$  and  $NPP_r$  have been computed, is allocated to the other compartments (i.e., fruits, stems, and reserves), with the same proportionality coefficients as computed in the standard version of ORCHIDEE. If  $NPP_{\text{residual}}$  is negative (i.e.,  $NPP_l + NPP_r >$  daily total NPP), nothing can be allocated to fruits and stems, and the required amount is removed from the reserves (i.e.,  $NPP_l + NPP_r - \text{NPP}$ ). If the extreme case occurs in which the reserves are not sufficient, then the amounts allocated to leaves and roots have to be reduced, while conserving the ratio between them, but the consistencies between LAI and leaf biomass, root length, and root biomass are lost. This extreme case will only happen if the reserves (put aside at last year's harvest) at the sowing date are not sufficient to represent the amount of seeds that have actually been sown.

Leaf net senescence in our updated version of ORCHIDEE starts when the daily increment of LAI becomes negative. Then, the daily amount of dead aboveground biomass ( $Q_l$ ), which immediately becomes metabolic litter (i.e., sugars and cellulose with fast decomposition), is computed as follows:

$$Q_l = -\frac{dLAI}{dt} \left(\frac{1}{sla}\right).$$

Dead roots are similarly added to the belowground metabolic litter.

### 3.3.4. Root density profile and soil moisture stress

Soil moisture in ORCHIDEE controls transpiration and bare ground evaporation through a water uptake function ( $U_s$ ). This function is based on the assumption that the vertical root density profile [ $R(z)$ ] is nearly exponential (Ducoudré et al. 1993; de Rosnay and Polcher 1998):

$$R(z) = e^{-cz},$$

where  $c$  is a single number per plant type describing the profile set to  $4 \text{ m}^{-1}$  for all crops.

The soil column in ORCHIDEE consists of two layers (Choisnel 1977). The upper layer is of variable depth and is created when precipitation ( $P$ ) exceeds evapotranspiration (ETR). When ETR rises over  $P$ , the lower reservoir behaves as a bucket model. A step function was chosen to define the moisture profile in each layer with a dry soil height ( $h_{id}$  for the  $i$ th reservoir) below which the soil is at saturation and above which the soil is dry. For the  $i$ th layer  $U_s$  is computed as

$$U_{is} = e^{-ch_{id}}.$$

STICS daily computes a root density profile that can be quite different from the one used in ORCHIDEE (Figure 4), with fewer roots in the upper 20 cm of soil and more below. The depth of the root front ( $Z_r$ ) is an important variable that determines the maximum depth from which plants can extract water ( $Z_r$  can be much lower than the maximum soil depth considered at each site, especially at the beginning of the growing season). Here  $Z_r$  equals 0 at the sowing depth and

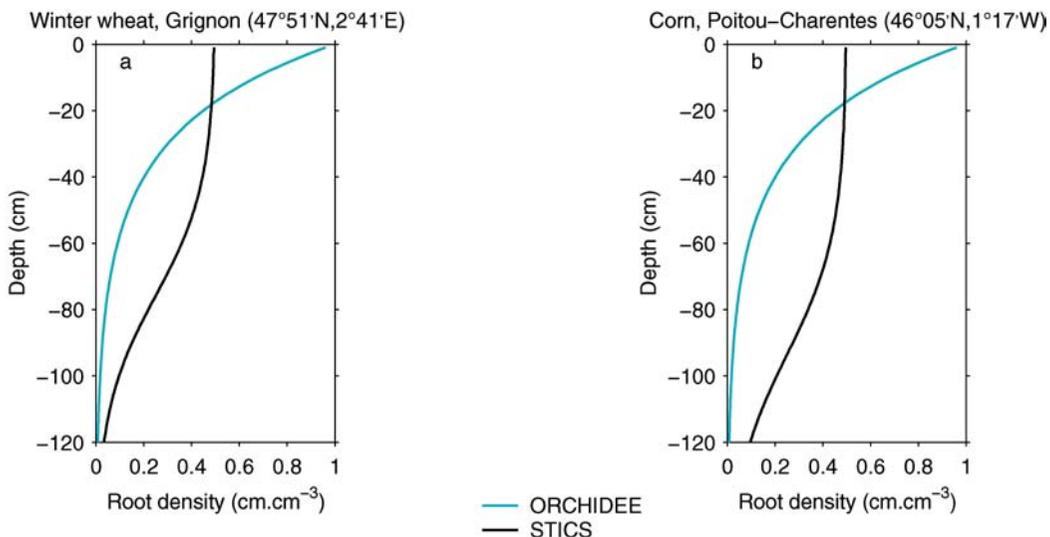


Figure 4. Mean root density profile when LAI has reached its maximum values. Simulated values from STICS are plotted using the black line, while prescribed values for ORCHIDEE are plotted using the blue line. Results are shown for (a) winter wheat at Grignon in 1995 and (b) corn in Poitou-Charentes in 1996.

increases until it reaches the prescribed bottom of the soil, or until LAI reaches its maximum value (see section 3.3.1.) The root length is computed as a function of depth [ $L_r(z)$ : set to 0 below  $Z_r$ ] following formulations similar to the ones used for LAI (i.e., using the GDD concept). When this simulated root density profile is used in ORCHIDEE instead of the original exponential function,  $U_{is}$  then becomes

$$U_{is} = \int_{h_{id}}^{h_i} L_r(z) dz / \int_0^{h_i} L_r(z) dz,$$

where  $h_i$  is the total depth of the  $i$ th layer (equal to 0 at ground surface). Relative soil moisture in each layer is therefore simply computed as the ratio between the density of roots that are immersed in water and the total root density in the layer.

### 3.3.5. Vegetation height

Vegetation height is used together with LAI to compute roughness length and therefore affects all turbulent fluxes (e.g., evapotranspiration and sensible heat flux). It is prescribed in ORCHIDEE for each PFT and does not vary with time. Crops, for example, never exceed 5 cm (as for a natural grass), whereas in reality they are much taller during the growing season (80 cm to 2 m).

STICS, on the other hand, computes a daily crop height that we have decided to use in ORCHIDEE instead of the prescribed value.

Increasing the vegetation height results in increased roughness length and decreased aerodynamic resistance. This has a direct impact on the turbulent heat fluxes and thereby on surface temperature.

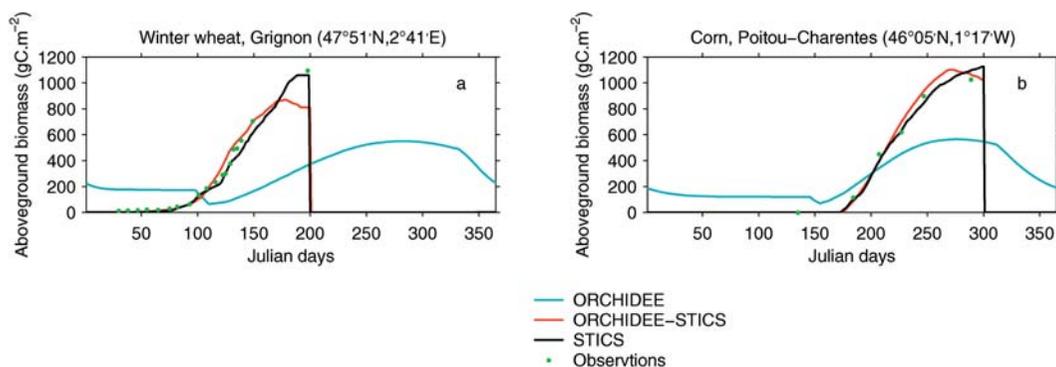
### 3.3.6. Nitrogen stress

ORCHIDEE, in its standard version, is unable to account for nitrogen stress, while even at crop sites, stress can occur if fertilizers are not brought in sufficient quantity.

To more properly account for this, we have multiplied the rates of carboxylation and RuBP regeneration simulated by ORCHIDEE by the nitrogen stress (a function varying between 0 and 1) simulated by STICS. In the following, ORCHIDEE will refer to the standard version of our code, while ORCHIDEE-STICS will refer to the version accounting for the improvements described in this section.

## 4. Evaluation of ORCHIDEE-STICS at specific sites

ORCHIDEE-STICS simulations were carried out at four different sites where meteorological, site-specific, and validation data were available (Table 1). Total aboveground biomass had only been measured at two sites, evapotranspiration and net CO<sub>2</sub> flux at two other sites. Meteorological data include rainfall, wind speed, incoming solar and infrared radiation, ambient air temperature, and ambient air relative humidity. Where information on irrigation, fertilization, and harvest were not available, STICS was allowed to compute its own calendars and amounts applied. Two of the sites chosen are located in France, while the other two are



**Figure 5.** Temporal evolution of observed (green triangles) and simulated (plain lines) total aboveground biomass ( $\text{gC m}^{-2}$ ) starting 1 Jan (Julian day 1) and ending 31 Dec (Julian day 365). Simulated values from STICS are plotted using the black line, results from ORCHIDEE are plotted using the blue line, and those from ORCHIDEE-STICS are plotted using the red line. Results are shown for (a) winter wheat at Grignon in 1995 and (b) corn in Poitou-Charentes in 1996.

located in the United States. The same cultivar choice was made in the model at all sites for winter wheat and for corn (see Table 2). Because the American cultivars are probably not the same as the French, this approximation may lead to some discrepancies between the simulated and observed values, but our assumption here is that the major improvement in the variables and fluxes simulated by ORCHIDEE will be achieved by the changes introduced, rather than by the choice of the exact cultivar (Kucharik 2003).

#### 4.1. Evaluation of total aboveground biomass

Aboveground biomass is the main variable against which crop models are regularly evaluated and is the first one we have chosen for ORCHIDEE-STICS to highlight the benefits of coupling both models. Figure 5 shows, for the two French sites chosen, the observed seasonality of total aboveground biomass, together with the ones simulated by the standard version of ORCHIDEE, by STICS, and by ORCHIDEE-STICS. The largest difference is obtained for winter wheat (see discussion in section 2). At both sites the timing is predicted more accurately by ORCHIDEE-STICS, and the amplitude is increased in response to the larger LAI values.

Aboveground biomass increases in ORCHIDEE-STICS until day 160 for wheat and 265 for corn, and then decreases following the decrease in LAI (Figure 1) and the immediate conversion of senescent leaves into litter (no standing dead biomass in ORCHIDEE-STICS). In STICS, on the other hand (as in reality), the decrease in aboveground biomass does not start before harvest because dead biomass only becomes litter at the last moment. This explains the apparent underestimation of the peak value that is rubbed out if litter is added to standing (and living) biomass in ORCHIDEE-STICS.

The three major changes that have a significant impact at these sites are, in

**Table 3. Description of all simulations carried out to evaluate, step by step, the impact of the changes we made to ORCHIDEE. Simulation S6 corresponds to the final version: ORCHIDEE-STICS, while simulation S0 corresponds to the standard ORCHIDEE.**

Name	LAI	$V_{cmax}$	Nitrogen stress	Alocation, senescence and export of grains	Root profile	Vegetation height
S0 ORCHIDEE	Computed	100	–	Standard	Prescribed	Prescribed
S1	From STICS	100	–	Standard	Prescribed	Prescribed
S2	From STICS	120	–	Standard	Prescribed	Prescribed
S3	From STICS	120	–	Modified	Prescribed	Prescribed
S4	From STICS	120	–	Modified	From STICS	Prescribed
S5	From STICS	120	–	Modified	From STICS	From STICS
S6 ORCHIDEE- STICS	From STICS	120	From STICS	Modified	From STICS	From STICS

decreasing order (Tables 3, 4, and 5; Figure 6): 1) the assimilation of LAI values simulated by STICS (section 3.3.1.); 2) the update of the allocation procedure and senescence, and the inclusion of export biomass (section 3.3.3.); and 3) the update of maximum rates of carboxylation and RuBP regeneration from natural grass to crop values (section 3.3.2.). Accounting for the simulated nitrogen stress becomes very important wherever fertilizers are not used or when the amount spilled is insufficient. It then strongly limits the productivity of the crop and the grain biomass (not shown). Assimilating the realistic crop height throughout the growing season changes the simulated latent and sensible heat fluxes within 10% of their maximum value at the peak of the growing season.

#### 4.2. Evaluation of the simulated evapotranspiration and net CO<sub>2</sub> flux

Testing our model against continuous H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> flux measurements (made using the eddy covariance method) is crucial to assess its performance in the view of an upcoming coupling with atmospheric models. We selected two sites from the Ameriflux network (Falge et al. 2000) where meteorological and flux data have been measured at the half-hourly time step: a winter wheat field at Ponca, Oklahoma (36°46'N, 97°08'W), and a corn field at Bondville, Illinois (40°00'N, 88°17'W). Sowing occurred on 14 October 1996 at Ponca (day 287; G. George 2001, personal communication), and 1 May 1997 at Bondville (day 121; T. Meyers 2001, personal communication). The harvest date is computed by STICS from the GDD concept used for leaf cycle and grain filling.

Figures 7a–d shows the seasonal evolution of net ecosystem exchange (NEE) and observed ETR, simulated by ORCHIDEE-STICS, and by the standard version of ORCHIDEE, while Figures 8, 9, and 10 show the correlations between the observed and modeled fluxes. ORCHIDEE-STICS reproduces very well the overall timing and amplitude of NEE throughout the year [with a best-fit line that is almost the 1:1 line, and a correlation coefficient of 0.8753 for winter wheat (Figure 8a) and of 0.9571 for corn (Figure 9a)], as well as the short-term variability within the

**Table 4.** Figure of Merit in Time (FMT), which is a statistical coefficient of the time analysis (see description below), for a number of variables simulated by ORCHIDEE-STICS at the winter wheat site of Grignon. These coefficients are computed to compare the different versions listed in Table 3 (S0 = ORCHIDEE, through S5) to ORCHIDEE-STICS (i.e., S6). The last line only compares ORCHIDEE-STICS to measurements. The FMT evaluates the overlap between two curves, normalized to the maximum value predicted at each time. The FMT is expressed in percent. A temporal shift of the time series can significantly reduce the FMT, even if predicted duration and absolute values are in good agreement. Also, a difference between predicted values can give a small FMT, even if time of arrival and duration are correctly predicted.

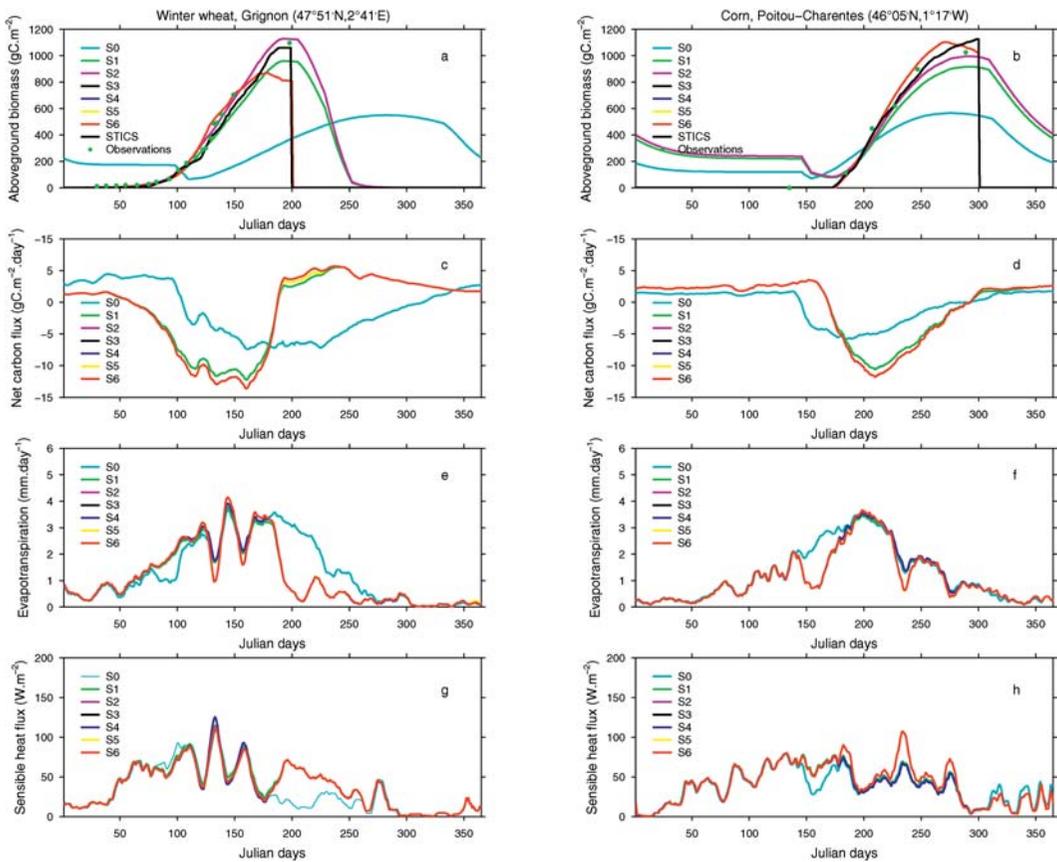
Simulation	Aboveground biomass whole year	Aboveground biomass from emergence through harvest	Evapo-transpiration whole year	Sensible heat flux whole year	Carbon net flux whole year	Soil water content whole year	Water stress index whole year
S0	15.4	37.8	78.6	76.4	12.4	86.4	68.1
S1	52.7	94.1	92.1	91.3	40.4	93.6	83.4
S2	45.8	85.4	96.6	96.1	42.4	95.1	85.5
S3	100	100	96.6	96.1	100	96.6	85.5
S4	100	100	96.6	96.1	100	96.6	97.6
S5	100	100	100	100	100	100	100
S6	100	100	100	100	100	100	100
Model/data	82.3	83.8					

crop season. ORCHIDEE, on the other hand, as already discussed for aboveground biomass, is obviously out of phase for winter wheat (Figure 10a) and the growing season is too long for corn with underestimated peak values (Figure 10e; the best-fit line is quite different from 1:1).

The wheat (corn) field acts as a net sink of atmospheric CO<sub>2</sub> between day 40 (160) and 140 (250), and as a net source the rest of the year. At both sites this change in behavior (w.r.t. CO<sub>2</sub>) occurs shortly before harvest (Figures 7e,f) at a

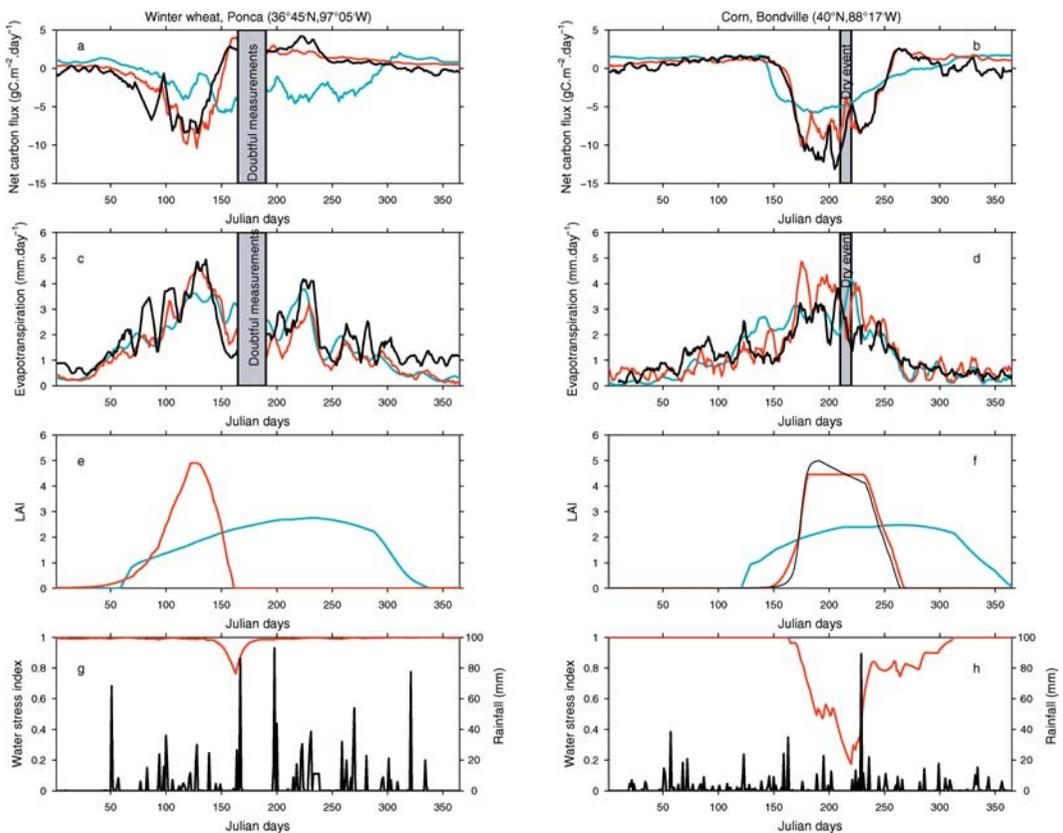
**Table 5.** Same as Table 4 but at the corn site of Poitou-Charentes.

Simulation	Aboveground biomass whole year	Aboveground biomass from emergence through harvest	Evapo-transpiration whole year	Sensible heat flux whole year	Carbon net flux whole year	Soil water content whole year	Water stress index whole year
S0	71.2	68.4	81.9	85.4	66.8	87.6	75.6
S1	79.7	96.7	91.6	93.3	76.6	97.6	81.6
S2	82.8	100	93.6	93.8	79.3	99.1	82.2
S3	100	100	95.1	93.8	100	99.1	82.2
S4	100	100	95.1	93.8	100	99.1	98.9
S5	100	100	100	100	100	100	100
S6	100	100	100	100	100	100	100
Model/data	55.8	87					



**Figure 6.** Temporal evolution of observed (green triangles) and simulated (plain lines) variables, starting 1 Jan (Julian day 1) and ending 31 Dec (Julian day 365). Simulated values from STICS are plotted using the black line, results from ORCHIDEE are plotted using the blue line, and those from ORCHIDEE-STICS are plotted using the red line. Other colors are used for different versions of ORCHIDEE-STICS (see Table 3 for the list). Results are shown for (a), (c), (e), (g) winter wheat at Grignon in 1995 and (b), (d), (f), (h) corn in Poitou-Charentes in 1996. (a),(b) Total above ground biomass (sum of leaves, stems, fruits, and reserves in  $\text{gC m}^{-2}$ ); (c),(d) net carbon flux emitted by the land surface ( $\text{gC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ; negative values indicate a biospheric sink); (e),(f) total evapotranspiration ( $\text{mm day}^{-1}$ ); and (g),(h) sensible heat flux ( $\text{W m}^{-2}$ ).

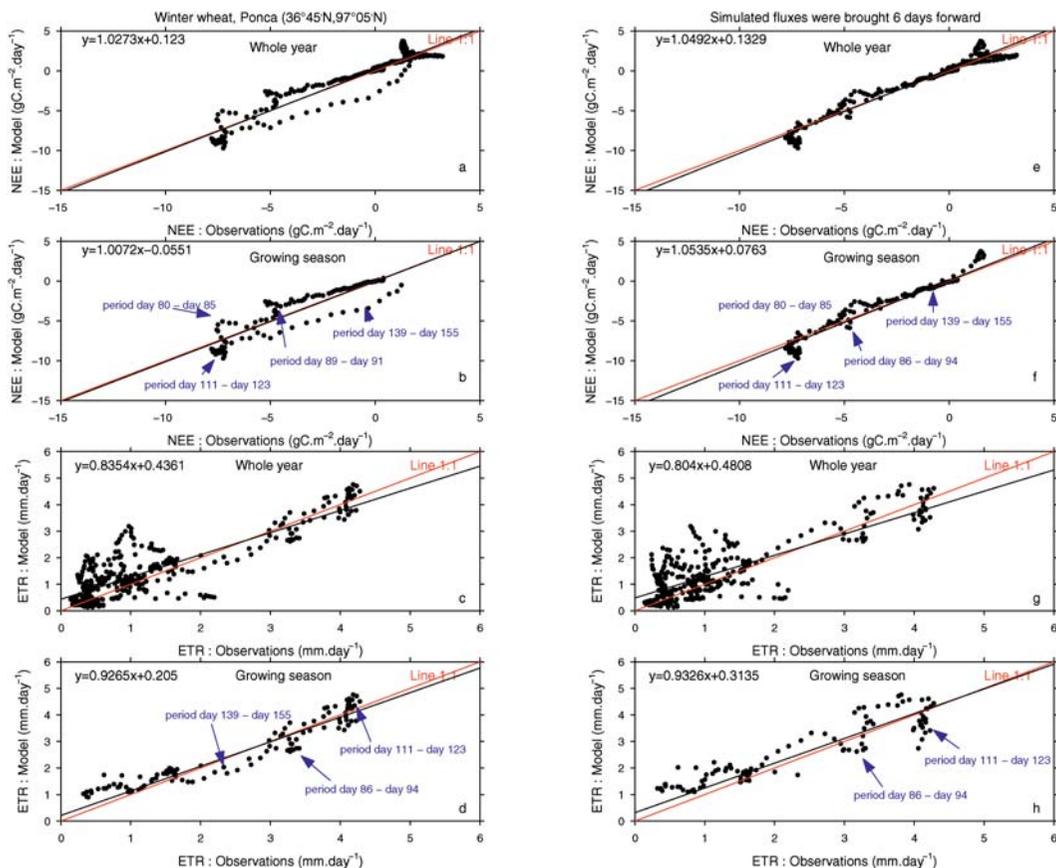
time when most leaves are senescent and photosynthesis cannot compensate for respiration. ORCHIDEE-STICS reproduces very well the timing from sink to source (and vice versa) for corn (at Bondville), while a delay of about 6 days is obtained for wheat (at Ponca). We have no LAI measurements at Ponca; therefore, we have no means to examine whether this delay could be explained by a similar delay in the simulated leaf cycle in 1997. But the hypothesis of a delayed growth of leaves in our model seems consistent with the growth rate of the net  $\text{CO}_2$  sink (i.e., slower in our model than in reality), and correlation with observations is even better after



**Figure 7.** Temporal evolution of a number of observed (plain black line) and simulated (blue line for ORCHIDEE and red line for ORCHIDEE-STICS) variables at the two U.S. sites: (a), (c), (e), (g) winter wheat at Ponca and (b), (d), (f), (h) corn at Bondville. (a),(b) Net ecosystem exchange ( $\text{gC m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ). Negative values represent a sink of  $\text{CO}_2$  with respect to the atmosphere, while positive values represent a source. (c),(d) Total evapotranspiration ( $\text{mm day}^{-1}$ ); (e),(f) LAI; (g),(h) observed rainfall ( $\text{mm day}^{-1}$ ; black line) and simulated water stress (red line). All values are presented as 5-day running means to smooth out very high frequencies. The vertical gray bar corresponds to a time period with measurements problems at Ponca, while it highlights the influence of water stress at Bondville.

accounting for the hypothesized delay [the correlation coefficient increases during the growing season (Figures 8b,f) from 0.8112 to 0.86 711 for NEE, and from 0.7065 to 0.8724 for ETR (Figures 8c,d,g,h) when accounting for the shift]. At Bondville (corn) the seasonal evolution of LAI is extremely well reproduced by ORCHIDEE-STICS (Figure 7f).

During the growing season, the observed maximum  $\text{CO}_2$  uptake is larger for corn ( $\sim -12 \text{ gC m}^2 \text{ day}$ ) than for wheat ( $\sim -8 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ), while in the simulations it is of about the same magnitude ( $\sim -10 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ). The slight overestimation of the carbon sink in our model at the peak of the growing season



**Figure 8.** Scatterplots showing the results obtained with ORCHIDEE-STICS vs observations at Ponca (winter wheat) for (a) NEE throughout the year, (b) NEE throughout the crop season (from emergence to harvest, i.e., day 310 of previous year to day 160), (c) ETR throughout the year, and (d) ETR throughout the crop season. The same variables are presented in (e)–(h) but once the model results have been shifted by 6 days to account for the supposed delay in leaf growth. The red line in all plots corresponds to the 1:1 line. Regression coefficients are computed with respect to the black lines (i.e., best fit).

could result from a delay in the growth of leaves, as suggested above, whereas in reality senescence has already started. At the corn site, the strong underestimation of the carbon sink, despite its correct timing, results from the water stress simulated by ORCHIDEE (Figure 7h), which limits photosynthesis and therefore the net uptake CO<sub>2</sub> flux. However, the simulated water stress (due to the lack of precipitation) is not sufficient for STICS to initiate irrigation. In reality corn had not been watered; therefore, the larger observed sink could be due to either the absence of water stress (suggesting an unrealistically high evapotranspiration rate in ORCHIDEE-STICS) or to the crop cultivar selected (the U.S. corn may be more resistant to rainfall deficit, i.e., have a much larger water-use efficiency, thereby lowering water losses while maintaining large rates of photosynthesis).

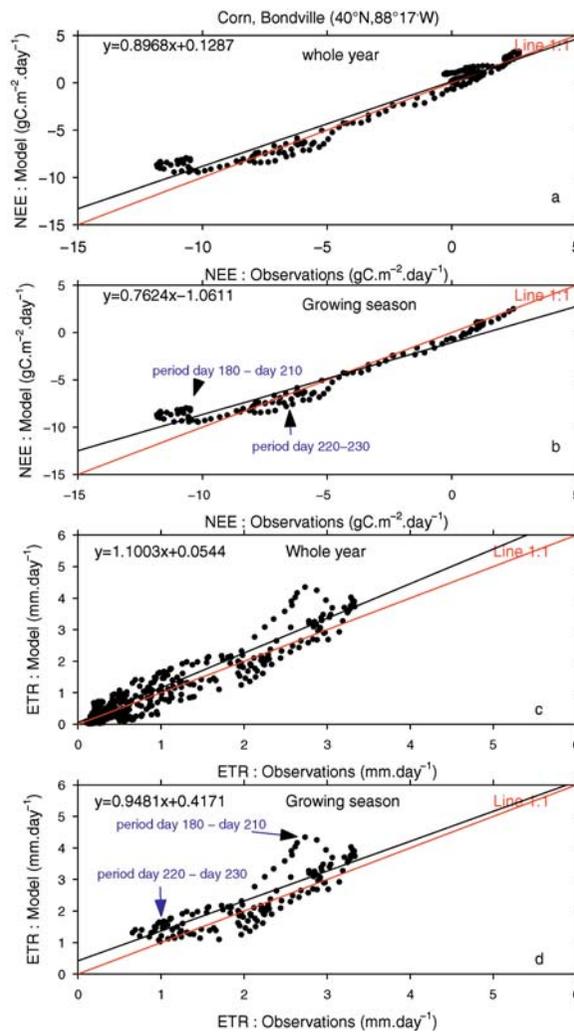
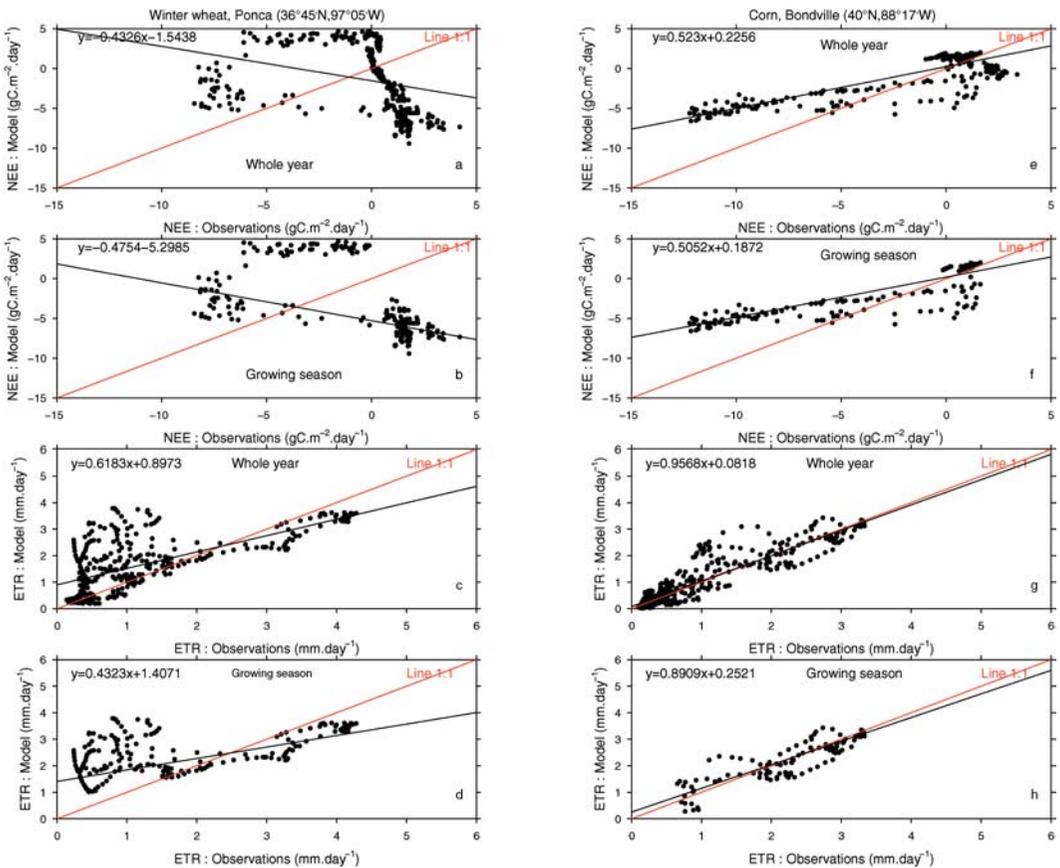


Figure 9. Same as Figure 8 except at Bondville (corn) for (a) NEE throughout the year, (b) NEE throughout the crop season (from emergence to harvest, i.e., day 133 to day 260), (c) ETR throughout the year, and (d) ETR throughout the crop season.

At harvest (i.e., day 160 for winter wheat and day 260 for corn in the model) there is an observed peak of  $\text{CO}_2$  release to the atmosphere (of about  $3\text{--}4 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ), which is well reproduced by the model at both sites. Litter is then added to the soil and starts to decompose. However, the simulated rate of decomposition is much lower than the one observed at Bondville (corn). Ploughing is not included in ORCHIDEE-STICS, while in reality it occurred shortly after harvest and helped accelerate litter decomposition. Moreover, because the net outgoing  $\text{CO}_2$  flux is lower (or equal) during the whole year in reality, our assumption is that less material is left on the ground by farmers, while in ORCHIDEE-STICS all leaves and stems become litter. At Ponca (winter wheat), the simulated rate of decomposition is of the right order of magnitude, except for the peak observed



**Figure 10.** Same as Figure 8 except the results obtained with the standard version of ORCHIDEE vs observations (a)–(d) at Ponca (winter wheat) and (e)–(g) at Bondville (corn) for (a),(e) NEE throughout the year; (b),(f) NEE throughout the crop season (from observed emergence to harvest); (c),(g) ETR throughout the year; and (d),(h) ETR throughout the crop season.

from days 200 to 220, which is related to ploughing (not included in ORCHIDEE-STICS).

There are substantial observed short-term fluctuations (episodes of 10–20-day duration) in NEE and ETR at both sites, especially during the growing season, that are rather well reproduced by ORCHIDEE-STICS. At Bondville (corn), for example, observed NEE suddenly increases (reduced CO<sub>2</sub> sink) between days 220 and 230 and is associated with a sharp decrease in ETR (Figure 7d, vertical gray lines). The same rapid changes also occur in the model, with similar amplitude, but about 10 days earlier than observed. In both cases (model and data), rain deficit is responsible (no rain was observed between days 205 and 220; Figure 7h), but the water stress response it induces seems to occur more slowly in reality than in the model, which responds to drought with almost no time lag. ORCHIDEE-STICS was already experiencing some water stress prior to this rain deficit and therefore reacted instantaneously to this new dry event. We believe that, in reality, soil

moisture was still abundant prior to this event, and the stress was therefore only felt when evapotranspiration had extracted enough water from the soil.

Sharp changes in NEE and ETR are also observed and modeled at Ponca (winter wheat) at the beginning of the growing season ( $\sim$ day 90; Figures 7a,c vertical dotted line). However, the simulated amplitude is smaller because LAI is still very low in ORCHIDEE, whereas it is probably larger in reality (given the large absolute NEE values observed). Moreover, and unlike what is observed at the corn site, the timing of this fluctuation is the same in the model as in reality. At the beginning of the growing season the soil is still wet enough for a rain deficit to be of less consequence (Figure 7g).

Outside of the growing season the simulated ETR is generally smaller than observed. If any natural grass is allowed to grow before crop sowing, then the discrepancy between model and data is understandable since bare ground is prescribed to ORCHIDEE-STICS after harvest. However, we have no field data to confirm this hypothesis, and therefore no means to check the quality of our simulation during that time period.

## 5. Concluding remarks

Cultivated plants are selected and grown to produce optimum yield and, as a result, might be less sensitive to, or more protected against, external factors (e.g., water stress, cold temperatures, and high wind) than wild species are. The impacts of spatially varying climate can therefore be exploited or counteracted by agricultural practices (e.g., choice of species and cultivars, irrigation, and fertilization) resulting in less spatially variable surface–atmosphere exchanges (e.g., latent and sensible heat flux, CO<sub>2</sub> flux). It is therefore crucial to account for these practices in land surface models for a more accurate simulation of carbon–water–energy fluxes, and of carbon and water stocks.

In this paper we focused on the two major cereal species found in European temperate regions (i.e., corn and winter wheat) and adapted our “generic” global terrestrial biosphere model (ORCHIDEE) in order to improve its representation of these ecosystems. To achieve this goal, we used the crop model STICS to produce “data” (with respect to, e.g., leaf and root area index, nitrogen stress, and vegetation height), and modified some formulations (e.g., allocation and water stress) and parameters (e.g., rates of carboxylation and RuBP regeneration) in ORCHIDEE to allow these external data to be assimilated in a proper way.

A similar approach has been adopted by Oliso et al. (Oliso et al. 2001; Oliso et al. 2002) using STICS to assimilate remotely sensed variables into another soil–vegetation–atmosphere transfer scheme. Kucharik and Brye (Kucharik and Brye 2003), on the other hand, have chosen to include adequate and mechanistic parameterizations of crop phenology in their dynamic global vegetation model to examine the simultaneous response of nitrate nitrogen leaching losses and maize yield to different amounts of nitrogen fertilizer. Both approaches are quite different but, if applied at the global scale, will meet the exact same problem, that is, the availability of a global description of crop distribution and management options (e.g., irrigation, fertilizer application, planting date, tillage). Our method has the advantage of using a *generic* crop model that has been thoroughly *validated* at

many different sites, using many different cultivars, and is *still under development* and *improvement* in many different agronomic research laboratories.

ORCHIDEE-STICS has been evaluated at four different sites. The simulated aboveground biomass, net ecosystem exchange, and evapotranspiration are in good agreement with observations (both amplitude and timing) despite the lack of data on agricultural practices. This increases our confidence in the future use of this model at the regional and global scale. Its improvements described here should improve our simulation of present-day climate and climate variability. Moreover, with respect to future climate change scenarios, our “coupled” model will allow us not only to simulate changes in agricultural yield in response to climate change, but also to simultaneously account for feedbacks between changes in crop behavior and the atmospheric state and circulation.

**Acknowledgments.** This work was carried out at the Laboratoire des Sciences du Climat et de l’Environnement (Saclay, France). The lead author was funded by the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) while working on his Ph.D. thesis. We are very grateful to Pascale Smith, who is starting a Ph.D. in our laboratory, and who took some of her research time to help us improve the clarity and language of the manuscript.

## References

- Alcamo, J., and Coauthors, 1998: Global modelling of environmental change: An overview of IMAGE 2.1. *Global Change Scenarios of the 21st Century: Results from the IMAGE 2.1 Model*. J. Alcamo, R. Leemans, and E. Kreileman, Eds., Elsevier Science, 3–94.
- Arrouyas, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana, and P. Stengel, 2002: Contribution à la lutte contre l’effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France? Expertise scientifique collective INRA, 332 pp.
- Boote, K.J., J.W. Jones, and N.B. Pickering, 1996: Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.*, **88**, 704–716.
- Botta, A., N. Viovy, P. Ciais, P. Friedlingstein, and P. Monfray, 2000: A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biol.*, **15**, 709–725.
- Betts, R.A., 1999: The impact of land-use on the climate of present day. Research activities in atmospheric and oceanic modeling, CAS/JSCE WGNE Rep. 28, WMO, Geneva, Switzerland, 7.11–7.12.
- Brisson, N., and Coauthors, 1998: STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterisation applied to wheat and maize. *Agronomie*, **18**, 311–346.
- , and Coauthors, 2002a: An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.*, **18**, 309–332.
- , and Coauthors, 2002b: STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, **22**, 69–93.
- Choisnel, E., 1977: Le bilan d’énergie et le bilan hydrique du sol. *La Météorologie*, **6** (11), 103–133.
- Collatz, G.J., M. Ribas-Carbo, and J.A. Berry, 1992: Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C<sub>4</sub> plants. *Aust. J. Plant. Physiol.*, **19**, 519–538.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall, and I. J. Totterdell, 2000: Acceleration of

- global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, **408**, 184–197.
- de Noblet-Ducoudré, N., S. Gervois, P. Ciais, N. Viovy, N. Brisson, B. Seguin, and A. Perrier, 2005: 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*, in press.
- de Rosnay, P., and J. Polcher, 1998: Modeling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **2**, 239–255.
- de Wit, C.T., 1978: Simulation of assimilation respiration and transpiration of crops. *Simulation Monogr.*, Pudoc, 141 pp.
- Ducoudré, N., K. Laval, and A. Perrier, 1993: SECHIBA, a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land–atmosphere interfaces within the LMD atmospheric general circulation model. *J. Climate*, **6**, 248–273.
- Dufresne, J.-L., L. Fairhead, H. LeTreut, L. Berthelot, L. Bopp, P. Ciais, P. Friedlingstein, and P. Monfray, 2002: On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1405, doi:10.1029/2001GL013777.
- du Monceau, D., 1761: *Traité de la culture des terres, suivant les principes de M. Tull*. Anglais 6 tomes, Paris.
- Falge, E., and Coauthors, 2000: Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agric. For. Meteorol.*, **170**, 71–77.
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer, and J.-A. Berry, 1980: A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, **149**, 78–90.
- Friedlingstein, P., G. Joel, C.B. Field, and Y. Fung, 1998: Toward an allocation scheme for global-terrestrial carbon models. *Global Change Biol.*, **5**, 755–770.
- , J.-L. Dufresne, P.M. Cox, and P. Rayner, 2003: How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus*, **55B**, 692–700.
- Gregory, P.J., J.A. Palta, and G.R. Batts, 1997: Root systems and root mass ratio—Carbon allocation under current and projected atmospheric conditions in arable crops. *Plant Soil*, **187**, 221–228.
- Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen, and H. Swenden, 1990: DAISY, a soil-plant system model. Danish simulation model for transformation and transport of energy and matter in the soil plant atmosphere system, National Agency for Environmental Protection, Copenhagen, Denmark, 369 pp.
- Janssens, I.A., and Coauthors, 2003: Europe’s terrestrial biosphere absorbs 7% to 12% of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science*, **300**, 1538–1542.
- Jones, C.A., J.T. Ritchie, J.R. Kiniry, and D.C. Goodwin, 1986: Subroutine structure. *CERES Maite: A Simulation Model of Maite Growth and Development*, C.A. Jones and J.R. Kiniry, Eds., Texas A&M Press, 49–105.
- Krinner, G., and Coauthors, 2005: A dynamical global vegetation model for studies of the coupled atmosphere–biosphere system. *Global Biogeochem. Cycles*, in press.
- Kucharik, C.J., 2003: Evaluation of a process-based agro-ecosystem model (Agro-IBIS) across the U.S. Corn Belt: Simulations of interannual variability in maize yield. *Earth Interactions*, **7**. [Available online at <http://EarthInteractions.org>.]
- , and K.R. Brye, 2003: Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. *J. Environ. Qual.*, **32**, 247–267.
- Nobre, C., P.J. Sellers, and J. Shukla, 1991: Amazonian deforestation and regional climate change. *J. Climate*, **4**, 957–988.
- Olioso, A., Y. Inoue, J.P. Wigneron, O. Ortega-Farias, P. Lecharpentier, M. Pardé, J.C. Calvet,

- and O. Inizan, 2001: Using a coupled crop-SVAT model to assess crop canopy processes from remote sensing data. *IGARSS 2001*, Sydney, Australia, IEEE Publications.
- , and Coauthors, 2002: Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *First Int. Symp. on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Valencia, Spain, Publicacions de la Universitat de València, 329–338.
- Polcher, J., K. Laval, L. Dümenil, J. Lean, and P.R. Rowntree, 1996: Comparing three land surface schemes used in GCMs. *J. Hydrol.*, **18**, 373–394.
- Ritchie, J.T., and S. Omer, 1984: Description and performance of CERES-Wheat, a user-oriented wheat yield model. USDA-ARS-SR Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, 159–175.
- Sitch, S., and Coauthors, 2003: Evaluation of ecosystems dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biol.*, **9**, 161–185.
- Smith, P., R. Milne, D.S. Powlson, J.U. Smith, P.D. Falloon, and K. Coleman, 2000: Revised estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land. *Soil Use Manage.*, **16**, 293–295.
- van Deipen, C.A., J. Wolf, H. van Keulen, and C. Rappoldt, 1989: WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use Manage.*, **5**, 16–24.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco, and J.M. Melillo, 1997: Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, **277**, 494–499.
- Vleeshouwers, L.M., and A. Verhagen, 2002: Carbon emission and sequestration by agricultural land use: A model study for Europe. *Global Change Biol.*, **8**, 519–530.
- Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke, 1984: A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE*, **27**, 129–144.
- Wullschleger, S.D., 1993: Biochemical limitations to carbon assimilation in C<sub>3</sub> plants, A retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. *J. Exp. Bot.*, **44**, 907–920.
- Xue, Y., and J. Shukla, 1993: The influence and land surface properties on Sahel climate. Part I: Deforestation. *J. Climate*, **6**, 2232–2246.
- Zhao, M., A.J. Pitman, and T. Chase, 2001: The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dyn.*, **17**, 467–477.

### 3.4 Analyses complémentaires à l'échelle locale

En complément de la validation effectuée sur les flux d'eau et de carbone sur les deux sites agricoles (Ponca et Bondville) qui est présentée et discutée dans la publication, le modèle a été ensuite évalué sur l'efficacité de conversion ainsi que sur les stocks de carbone du sol. Les flux d'eau et de carbone sont représentatifs de processus à l'échelle instantanée, et l'efficacité de conversion et le stock de carbone sont deux variables représentatives des processus plus intégrés dans le temps (sur le cycle saisonnier ou l'année entière). Enfin, nous avons évoqué lors de la description du modèle ORCHIDEE-STICS, que le bilan hydrique et le bilan d'énergie sont calculés en double. Pour étudier les différences entre les deux modèles, nous avons comparé les températures de surface et les réserves hydriques du sol simulées.

#### 3.4.1 L'efficacité de conversion

Aucune donnée de biomasse n'est disponible sur les deux sites tests de Ponca et Bondville, ce qui restreint les possibilités de validation des processus intégrés sur l'ensemble du cycle saisonnier. On compare l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en biomasse (EC) simulée par ORCHIDEE-STICS avec les mesures disponibles dans la bibliographie. L'EC est le rapport entre la NPP et le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par le couvert (PAR). L'EC journalière est étroitement liée à la phénologie : la valeur maximum est généralement atteinte lorsque le LAI est maximum, cette valeur est plus faible au début et à la fin du cycle. L'EC annuelle est une grandeur quasiment constante pour une espèce donnée et pour une zone climatique donnée (Ruimy *et al.*, 1994), et peut servir de référence. La valeur annuelle sera considérée ici, et vaut :

$$EC = \frac{NPP_{an}}{PAR_{an}} \quad (3.1)$$

Où  $NPP_{an}$  est la NPP annuelle (unités  $gC.m^{-2}.j^{-1}$ ) et  $PAR_{an}$ , (unités  $MJ.m^{-2}.j^{-1}$ ) la somme du PAR sur l'année. Les données d'EC de Gower *et al.* (1999) et de Ruimy *et al.* (1994) ont été établies en regroupant et compilant les mesures expérimentales disponibles sur les cultures les plus répandues. Dans ces études, les valeurs d'EC permettent de calculer la production de biomasse annuelle à partir des données de PAR (Rayonnement Photosynthétiquement actif Absorbé, cf. chapitre 4) issues des mesures satellitaires et de la carte des types de végétation. L'EC annuelle simulée par ORCHIDEE-STICS vaut respectivement 1.41 et 1.70 sur les sites de blé et de maïs, ce qui est en bon accord avec les valeurs de Gower *et al.* et de Ruimy *et al.* (tableau 3.1). On remarque aussi que les différences entre les estimations et le modèle sont plus faibles que celles entre les cultures et les herbacées naturelles.

	Cultures en C <sub>3</sub>	Cultures en C <sub>4</sub>	Herbacées naturelles C <sub>3</sub>	Herbacées naturelles C <sub>4</sub>
ORCHIDEE – STICS	1.41 (blé d'hiver)	1.70 (maïs)	1.06	1.23
Gower <i>et al.</i> (1999)	1.47 (moyenne des cultures en C <sub>3</sub> )	1.68 (moyenne des cultures en C <sub>4</sub> )	0.97	--
Ruimy <i>et al.</i> (1994)	1.35 (moyenne des cultures en C <sub>3</sub> )	1.75 (moyenne des cultures en C <sub>4</sub> )	0.91	1.17

Tableau 3.1 Efficiences de conversion comparées entre ORCHIDEE – STICS et les études de Gower *et al.* (1999) et de Ruimy *et al.* (1994) (unités g<sub>c</sub>.MJ<sup>-1</sup>).

### 3.4.2 Les stocks de carbone dans le sol

L'étude des stocks de carbone agricole est un domaine d'application de la thèse. Au chapitre 4, nous mettrons en évidence l'impact des cultures sur le contenu en carbone du sol, ensuite au chapitre 5, nous montrerons les conséquences des variations des facteurs environnementaux (climat, CO<sub>2</sub>, pratiques agricoles) sur les stocks de carbone. Il apparaît donc nécessaire d'évaluer préalablement le réalisme des stocks simulés. Pour cela, les stocks de carbone simulés par ORCHIDEE - STICS sont comparés à ceux simulés par le modèle SUNDIAL (Bradbury *et al.*, 1993) sur un site de blé d'hiver du sud-est de l'Angleterre (AVE1). SUNDIAL (Simulation of Nitrogen Dynamic In Arable Land) est spécialement conçu pour les sols agricoles, et il intègre l'effet des pratiques agricoles : fertilisants, labour, date de semis, espèce cultivée. Dans SUNDIAL, la représentation du stock de carbone est discrétisée en fonction de la profondeur. Les stocks simulés par SUNDIAL ont fait l'objet d'une étude de validation (Smith *et al.*, 2001a). La représentation du carbone du sol diffère entre les deux modèles. Comme décrit au chapitre 2, ORCHIDEE possède trois réservoirs (passif, lent et actif) avec des temps de décomposition différents (respectivement environ 500, 30 et 1 an). SUNDIAL ne comporte que deux réservoirs (humus et bio) dont les temps de décomposition sont analogues aux réservoirs lent et actif d'ORCHIDEE. Il n'y a donc pas d'équivalent du réservoir passif d'ORCHIDEE dans SUNDIAL, autrement dit du carbone sous une forme stable. C'est réaliste, il y a très peu de carbone sous sa forme la plus stable dans les sols agricoles en raison des labours successifs qui remobilisent de manière continue le sol. La mise en évidence de différences entre ces deux modèles servira de base à des améliorations futures d'ORCHIDEE – STICS. Cette comparaison a été réalisée lors d'un séjour de quatre semaines en octobre 2002, au « Plant and Soil Science Laboratory », un laboratoire d'écologie végétale et de pédologie, à l'Université d'Aberdeen, sous la direction de Pete et Jo Smith.

La comparaison effectuée sur le site de blé montre que les stocks simulés par ORCHIDEE-STICS (74 t.ha<sup>-1</sup>) sont quasiment le double de ceux de SUNDIAL (36 t.ha<sup>-1</sup>) (figure 3.1). La valeur d'ORCHIDEE-STICS est comparable à celle généralement observée sur les prairies naturelles (Arrouays *et al.*, 2002). Deux causes (dont les effets s'ajoutent) peuvent être avancées pour expliquer les stocks de carbone surestimés par ORCHIDEE-STICS :

- La quantité de biomasse retirée du champ est sous-estimée. En effet, seuls les grains sont exportés, ce qui représente 41% de la biomasse aérienne totale. Les tiges et les feuilles sont transformés en litière et se décomposent sur place. Cependant, dans la réalité, une partie de la paille est aussi retirée du champ, pour servir entre autres de nourriture et de litière au bétail.

D'ailleurs dans SUNDIAL, 65% de la biomasse aérienne est retirée du champ pour la simulation réalisée (valeur prescrite par défaut). Nous avons donc réalisé une deuxième simulation avec ORCHIDEE – STICS, où 65% de la biomasse aérienne est exportée (l'ensemble des grains ainsi que 39% de la biomasse des tiges est exportée, la quantité restante des tiges et celle des feuilles est transformée en litière). Les stocks simulés par ORCHIDEE-STICS (47 t.ha<sup>-1</sup>) sont beaucoup plus réalistes, bien qu'encore surestimés d'environ 30%.

- Le labour n'est pas pris en compte dans ORCHIDEE – STICS, or, il oxygène et ameublité le sol, la surface d'échange entre la matière organique et le sol augmente. La minéralisation de la matière organique (i.e. le départ de carbone du sol vers l'atmosphère) est accélérée. Le labour est pris en compte dans le modèle SUNDIAL, il est prescrit au 4 septembre, soit quatre jours après la récolte. Pour étudier son impact sur le stock de carbone du sol, il aurait été intéressant de réaliser une deuxième simulation avec SUNDIAL en ne prescrivant aucun labour. Nous n'avons cependant pas pu réaliser cette simulation, car une telle simulation nécessite de modifier certains paramètres du modèle, auxquels nous n'avons pas eu accès.

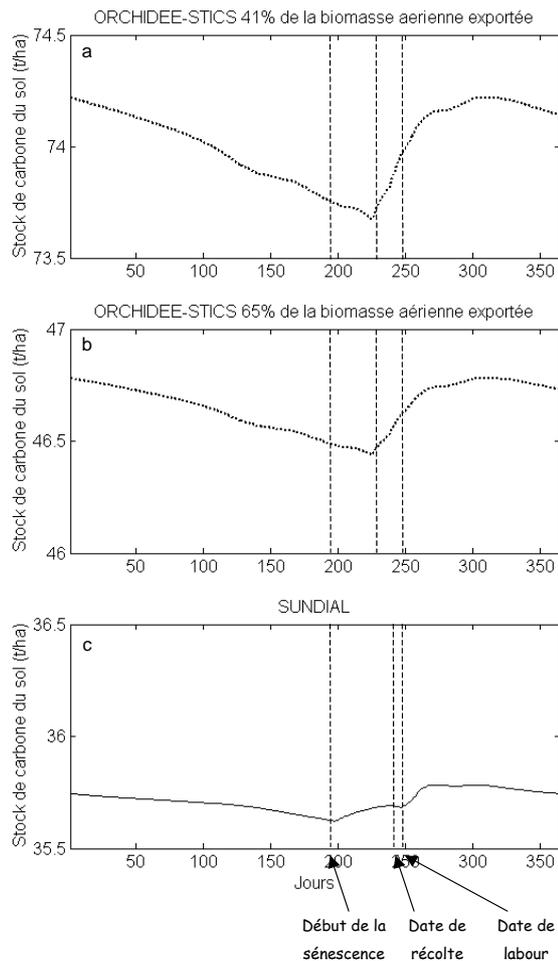


Figure 3.1 Comparaison des stocks de carbone du sol total simulé par ORCHIDEE – STICS (a et b) (en pointillés) et SUNDIAL (en trait plein) (c) sur le site de blé d'hiver AVE1 situé au SE de l'Angleterre.

Nous avons aussi comparé l'évolution saisonnière du stock de carbone entre les deux modèles. Deux périodes peuvent être séparées sur l'année : une phase de stockage durant les deux mois suivant la récolte, et une phase de déstockage durant le reste de l'année. Des différences apparaissent entre les deux modèles. La période de stockage du carbone débute plus tôt dans SUNDIAL (début de la sénescence, autour du 20 juillet) que dans ORCHIDEE (début septembre, une fois la récolte effectuée). Cette différence peut s'expliquer par le fait que les vitesses de transformation de la biomasse contenue dans le compartiment « litière » en carbone sol (processus appelé humification) de SUNDIAL sont plus rapides que celles d'ORCHIDEE-STICS. 21% de la litière s'est humifiée dans SUNDIAL (soit  $0.09 \text{ tC.ha}^{-1}$ ) contre seulement 6% dans ORCHIDEE (soit  $0.03 \text{ tC.ha}^{-1}$ ). La quantité de biomasse de la plante, transformée en litière durant la sénescence, est voisine dans les deux modèles :  $310 \text{ gC.m}^{-2}$  dans ORCHIDEE-STICS (somme des compartiments « feuilles » et « racines ») et  $280 \text{ gC.m}^{-2}$  dans SUNDIAL (pas de compartiment de biomasse individualisé, le pourcentage de biomasse totale qui part en litière durant la sénescence est prescrit arbitrairement). La période de « stockage » se termine aussi plus tôt dans SUNDIAL (jour 269, soit le 27 septembre, qui correspond à 3 semaines après le labour) que dans ORCHIDEE (jour 315 soit 12 novembre). Le labour qui suit la récolte a permis l'enfouissement de la partie aérienne de la litière, ce qui accélère sa transformation en carbone du sol (processus appelé humification). Pendant les trois semaines suivant le labour, on note dans SUNDIAL, un stockage rapide du carbone. Au 27 septembre, la quasi-totalité de la litière s'est humifiée. Il n'y a plus de stockage de carbone à partir de cette date.

En résumé, cette comparaison a mis en évidence que les stocks de carbone des sols agricoles simulés par ORCHIDEE – STICS sont largement surestimés. Nous avons souligné l'importance de représenter de manière la plus réaliste possible, la récolte dans ORCHIDEE, et en particulier de rajouter l'exportation des tiges (en plus des grains déjà exportés dans le modèle). D'autre part, l'importance de la prise en compte du labour dans ORCHIDEE-STICS pour simuler des stocks de carbone plus réalistes a été montrée. Au chapitre 4, la comparaison des stocks de carbone simulés avec les valeurs issues de la base de données, établie par Arrouays *et al.* (2002) permettra de vérifier si les stocks de carbone agricoles sont surestimés sur l'ensemble de la France.

### **3.4.3 Le double calcul du bilan hydrique et du bilan d'énergie : comparaison de la température de surface et du contenu eau du sol simulés par ORCHIDEE – STICS et par STICS.**

Dans la publication jointe au chapitre, nous avons évoqué le fait que le bilan hydrique et le bilan d'énergie sont calculés de manière indépendante par ORCHIDEE et par STICS. Pour évaluer les différences entre les deux modèles, nous avons comparé la température de surface et le contenu en eau du sol simulés, sur le site de calibration de Poitou-Charentes (maïs). La réserve utile est identique dans les deux modèles ( $150 \text{ mm.m}^{-1}$ ) et la profondeur totale est prescrite à 2m. La figure 3.2a montre que les températures sont plus élevées de  $1^\circ\text{C}$  (jusqu'à  $2^\circ\text{C}$  certaines journées ensoleillées de juin) dans ORCHIDEE-STICS que dans STICS. On remarque aussi que le contenu en eau du sol est généralement plus faible dans STICS. L'ETR calculée par STICS est plus élevée de 0.3 à  $0.8 \text{ mm.j}^{-1}$  suivant le cas ( $0.48 \text{ mm.j}^{-1}$  sur l'ensemble du cycle saisonnier) (figure 3.2b). Comme le rayonnement incident est le même, une plus grande fraction de l'énergie incidente absorbée est utilisée pour évaporer l'eau et non pour chauffer la surface, dans STICS, comparé à ORCHIDEE-STICS (tableau 3.2). En résumé, cette comparaison montre que la divergence entre les deux modèles n'est

pas trop importante, mais le problème n'est pas réglé. En effet des divergences plus importantes peuvent apparaître dans des conditions climatiques plus sèches.

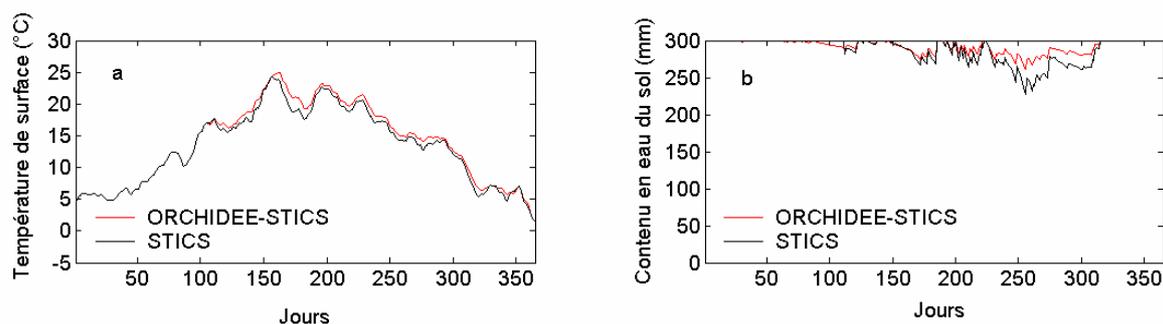


Figure 3.2 Température de surface (a) et contenu en eau du sol (b) simulés par ORCHIDEE - STICS (courbe rouge) et par STICS (courbe noire) sur le site de maïs de Poitou-Charentes.

	Température de surface (°C)	ETR (mm.j <sup>-1</sup> )	Réserves en eau du sol (mm)
STICS	19.1	3.25	287
ORCHIDEE - STICS	18.2	2.77	279

Tableau 3.2 Comparaison des températures de surface, des ETR, et des contenus en eau du sol simulés par STICS et par ORCHIDEE - STICS, sur le site de maïs de Poitou-Charentes. Ces moyennes ont été effectuées sur la période comprise entre les jours 112 et 290.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, grâce au couplage avec STICS, nous avons amélioré les flux simulés par ORCHIDEE au-dessus des surfaces agricoles. Ce nouveau modèle est prêt à être utilisé à l'échelle de l'Europe. Le couplage repose sur la communication à ORCHIDEE de certaines variables de sortie de STICS. Le transfert des variables s'effectue de la manière suivante : STICS calcule une fois par jour et envoie à ORCHIDEE : le LAI, le stress azoté, le profil racinaire, la hauteur du couvert et le calendrier d'irrigation (si ce dernier n'est pas disponible). D'autres modifications internes à ORCHIDEE sont apparues nécessaires, en particulier l'augmentation du rendement de la photosynthèse, l'allocation des assimilats, ainsi que l'exportation de la biomasse au moment de la récolte. L'apport de chaque modification a été évalué et nous avons montré l'importance de la prise en compte de l'indice foliaire par rapport aux autres variables du couplage. Dans un deuxième temps, la confrontation des sorties du modèle avec les mesures de flux (eau et carbone) sur sites agricoles met en évidence un très bon accord entre ORCHIDEE-STICS et les observations. En complément, la comparaison de l'efficacité de conversion annuelle de l'énergie solaire en biomasse simulée avec les mesures issues de la bibliographie, montre que les valeurs simulées sont réalistes de même que l'écart relatif entre les cultures en C<sub>3</sub> et celles en C<sub>4</sub>. En revanche, le stock de carbone sol reste surestimé de manière importante. Même si l'exportation d'une plus grande partie de la biomasse aérienne de la culture au moment de la récolte améliore nettement les résultats, il apparaît nécessaire de prendre en compte l'effet du labour devrait nous permettre d'obtenir des stocks plus réalistes.

D'autres équipes ont travaillé sur la représentation des zones cultivées dans les modèles globaux. Olioso *et al.* (2001, 2002) ont couplé le schéma de surface de Météo France ISBA (Noilhan et Planton, 1989) et STICS, pour améliorer l'assimilation de données satellitaires dans le modèle ISBA. Comme dans notre approche : il n'y a pas de rétroaction d'ISBA vers STICS. STICS calcule, à la place d'ISBA, le LAI et la hauteur de végétation. Dans ces conditions, afin de réduire une éventuelle divergence sur les contenus en eau du sol simulés, entre ISBA et STICS, Olioso *et al.*, assimilent l'humidité du sol calculée par STICS et initialisent ISBA à chaque début de journée.

L'équipe américaine du SAGE à l'Université du Wisconsin (Madison) (Kucharik et Brye 2003) ont introduit directement les paramétrisations spécifiques aux cultures dans le modèle global IBIS dans le but d'améliorer la représentation des zones agricoles. L'objectif initial de cette étude est différent, il s'agit principalement de simuler et d'anticiper la pollution par les nitrates du sol. La clé de voûte de leur travail est le développement d'une phénologie propre aux cultures qui tient compte des pratiques agricoles (date de semis, fertilisants, irrigation, labour). Nous retrouvons ici le fait que la représentation de l'indice foliaire est vraiment capitale. IBIS contrairement à ORCHIDEE possède le cycle de l'azote et peut donc intégrer directement le calendrier des fertilisations. Une approche très similaire a été tentée par Bondeau et Smith (en prép.) pour intégrer les zones cultivées dans le modèle global LPJ (Sitch *et al.* 2003) à l'échelle globale.

Pour ces deux approches, qui ont pour but de réaliser des simulations à l'échelle globale, il sera nécessaire de collecter les données de pratiques agricoles (date de semis, fertilisations, irrigation, labour) ainsi que les cartes de répartition des principales cultures. Un travail considérable de compilation des données de superficies occupées par les principales cultures à l'échelle mondiale a été effectué par Leff *et al.* (2004), à partir de la base de données de la FAO (FAO, 2002) et des cartes de répartition de cultures établies par Ramakutty et Foley (1999). Un avantage de notre méthodologie est qu'un calendrier des fertilisations et des irrigations peut être calculé par STICS, s'il n'est pas disponible. Néanmoins, les pratiques agricoles ne sont pas optimisées dans tous les pays. Une partie de cette information pourrait être déduite des statistiques de rendements fournies par la FAO (FAO, 2002) qu'on peut comparer avec les rendements optimaux fournis par STICS.

En résumé, notre approche utilise un modèle générique déjà validé préalablement sur de nombreux types de cultures. Cependant, elle comporte certaines incohérences (double calcul du bilan hydrique et du bilan d'énergie) inconnues dans l'approche intégrée, auxquelles il faudra remédier dans le futur. Nous ne remettons pas en cause le modèle agronomique et nous sommes donc limités à son domaine d'application. Toutefois, le couplage entre ORCHIDEE et STICS a permis d'améliorer de manière importante la représentation des zones cultivées, par rapport à la version d'ORCHIDEE de départ. Ces résultats encourageants nous incitent à poursuivre l'étude. Le développement ultérieur est envisagé suivant deux directions :

- Poursuivre les simulations en examinant comment le nouveau modèle peut gérer des surfaces étendues soumises à des climats différents. C'est dans ce but que nous réaliserons une simulation à l'échelle de l'Europe de l'Ouest dans les conditions de l'agriculture actuelle (chapitre 4).
- Etudier les capacités du modèle à reproduire l'évolution des changements environnementaux sur le XX<sup>e</sup> siècle (chapitre 5).

## Chapitre 4. Impact des zones cultivées sur les bilans d'eau et de carbone à l'échelle de l'Europe

---

### 4.1 Introduction

Le modèle ORCHIDEE - STICS a été mis au point et validé à l'échelle stationnelle, nous l'utilisons à présent sur l'Europe de l'Ouest. La première partie de ce chapitre vise à poursuivre l'évaluation du modèle en s'appuyant sur les statistiques de rendements agricoles de la FAO ainsi que sur les données satellitaires MODIS de LAI (Myneni *et al.*, 2002). Dans une deuxième étape, la comparaison des simulations réalisées avec ORCHIDEE-STICS et avec la version de départ d'ORCHIDEE, permettra d'étudier le rôle des zones agricoles sur les bilans d'eau, d'énergie et de carbone à l'échelle de l'Europe. Les points essentiels de cette analyse font l'objet d'une publication dans la revue *Agronomie* (de Noblet-Ducoudré *et al.*, sous presse), jointe en annexe (annexe B). A l'échelle locale, nous avons montré au chapitre précédent, un changement de saisonnalité entre les cultures et les herbacées naturelles, sur le LAI et les flux échangés entre la surface et l'atmosphère (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente, flux net de carbone) qui dépendent du LAI. On étudiera ce changement de saisonnalité sur l'Europe en insistant sur d'éventuelles différences régionales. L'analyse du bilan hydrique déterminera si les cultures contribuent à assécher le sol, ou au contraire, si elles conservent les stocks d'eau du sol. Les bilans de carbone agricole seront quantifiés pour les cultures à l'échelle de l'Europe. Les stocks de carbone du sol simulés seront comparés aux données d'Arrouays *et al.* (2002), établies sur l'ensemble de la France, et montrent que les stocks de carbone des cultures sont plus faibles que ceux des prairies ou des forêts. D'autres études sur les flux de carbone, comme celle de Janssens *et al.* (2003), ont montré, à partir des résultats du modèle CESAR (Vleeshouwers et Verhagen, 2002), que les cultures sont une source de carbone pour l'atmosphère, en incluant le rejet du CO<sub>2</sub> lors de la consommation des produits exportés. L'incertitude reste toutefois élevée (~100%) en raison des pratiques agricoles, comme le labour, qui influent beaucoup sur les flux de carbone (Smith *et al.*, 2000a). Dans ce chapitre, nous ne pouvons comparer directement les résultats obtenus avec l'étude de Janssens *et al.*, car nous avons réalisé des simulations à équilibre. Cette comparaison sera en revanche effectuée sur les simulations transitoires présentées au chapitre 5.

### 4.2 Présentation des simulations

Trois simulations sont réalisées sur l'Europe de l'Ouest (9°W-20°E ; 35.5°N-54.5°N) à la résolution spatiale du degré : la première avec la version de départ d'ORCHIDEE (Ostd), les deux suivantes avec ORCHIDEE-STICS (OSblé et OSsoja) (tableau 4.1).

Nom de la simulation	Modèle utilisé	Type de C <sub>3</sub> agricole
Ostd	ORCHIDEE standard	Prairie
OSblé	ORCHIDEE-STICS	Blé d'hiver
OSsoja	ORCHIDEE-STICS	Soja

Tableau 4.1 : Caractéristiques des simulations réalisées à l'échelle de l'Europe à la résolution horizontale du degré par degré, pour l'année particulière 2000. Dans chaque simulation: (1)les conditions par défaut d'ORCHIDEE : le sol est saturé en eau (soit 300 mm), le stock de carbone du sol est nul ; (2)la durée de la simulation est de 200 ans.

#### 4.2.1 Choix des cultures pilotes : le blé d'hiver, le maïs grain et le soja

Le blé d'hiver est la culture la plus répandue en Europe (FAO, 2002), il a été choisi pour représenter le PFT « agriculture en C<sub>3</sub> ». En France, les cultures d'hiver sont majoritaires et occupent 60.9 % de la superficie des cultures en C<sub>3</sub> (SCEES, 2001). Pour représenter les cultures de printemps dans le modèle et ne pas rajouter de PFT supplémentaire, une troisième simulation a été réalisée où le blé est remplacé par du soja. Le soja est une légumineuse assez exigeante en chaleur et sa culture ne peut se pratiquer dans les régions les plus septentrionales de notre zone d'étude. Il aurait peut-être été préférable de choisir une autre culture plus largement répandue en Europe, comme le tournesol, mais cette culture n'est pas disponible dans la version 4 de STICS. La comparaison des cultures d'hiver et de printemps, est intéressante dans la mesure où notre modèle permet d'anticiper les conséquences du choix d'une culture de printemps par rapport à une culture d'hiver pour les rendements, mais aussi les besoins en eau et le stockage du carbone. Pour le PFT « agriculture en C<sub>4</sub> », le choix s'est naturellement porté sur le maïs, les superficies occupées par les autres cultures en C<sub>4</sub> (sorgho, canne à sucre...) sont négligeables en Europe (FAO, 2002).

#### 4.2.2 Les données de forçage

Pour la réalisation des 3 simulations, les données de forçage suivantes ont été utilisées :

- La concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> est fixée à 369 ppm.
- Les données climatiques proviennent du CRU (Climate Research Unit) via le projet européen ATEAM (Hulme, 1994). Ce sont des moyennes mensuelles à la résolution spatiale de 10' qui ont été ensuite ré-interpolées au pas de temps horaire à l'aide de la variabilité fournie par les réanalyses d'ECMWF.
- Nous avons utilisé les variétés à cycle long, ce sont *Soisson* pour le blé, *EVK* pour le maïs et *Elma* pour le soja. Ces trois variétés sont cultivées sur les sites de calibration de STICS situés respectivement à Grignon, de Poitou-Charentes et d'Avignon.
- La date de semis est prescrite au 1<sup>er</sup> octobre pour le blé. Pour le maïs, elle est calculée et est déclenchée lorsque la température de l'air hebdomadaire dépasse 10°C (tableau 4.2). Compte tenu de ces exigences en chaleur, le soja est semé le 1<sup>er</sup> juin (Gondé et Jussiaux, 1980).
- Faute de données, les dates de fertilisation sont calculées par STICS pour chacune des trois cultures. Le seuil (prescrit) pour lequel est déclenchée une fertilisation est celui utilisé par défaut dans STICS. Une fertilisation est déclenchée si le stress azoté s'abaisse au-dessous de 0.85. Cette valeur est identique pour les trois cultures.

- Les dates d'irrigation sont calculées par STICS (pour le maïs uniquement). Une irrigation (dose prescrite égale à 20 mm) est déclenchée lorsque l'indice de stress hydrique descend au-dessous d'un seuil prescrit (0.85). Cette valeur est celle utilisée par défaut dans STICS. Aucune irrigation n'est prescrite pour le blé et le soja.
- Le calendrier de labour (dates et profondeur) est celui utilisé par défaut pour chacune des trois cultures, et est donc identique pour toutes les mailles.
- Pour la carte de végétation, les données CORINE (EEA, 1995) sont utilisées : le domaine spatial coïncide avec le nôtre, la résolution spatiale est de 10'. On a donc pour chaque maille le pourcentage de la superficie occupée par chaque type de végétation. Toutefois, CORINE ne distingue pas les types de cultures en C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub>. Nous utiliserons pour cela les données de superficie par culture et par pays, de la FAO (FAO, 2002). Ces valeurs ont été ensuite projetées sur une carte globale à la résolution spatiale de 0°5 x 0°5, pour les cultures en C<sub>4</sub>, année par année, depuis 1961 (P. Ciais et M. Schotze., communication personnelle). L'année 2000 a été choisie comme référence. Les rapports obtenus ont été utilisés pour séparer dans CORINE les C<sub>3</sub> des C<sub>4</sub>. La carte finale a une résolution spatiale de 10' dont les fractions couvertes par chaque PFT naturel sont identiques à la carte CORINE (figure 4.1). Nous faisons l'hypothèse arbitraire que, pour chaque maille d'un même pays, le rapport entre la superficie occupée par le blé (ou le maïs) et la superficie agricole totale est constant.

	<b>Blé</b>	<b>Maïs</b>	<b>Soja</b>
Date de semis	1 <sup>er</sup> octobre	T <sub>air</sub> hebdo > 10°C	1 <sup>er</sup> juin
Fertilisations	Calculée	Calculée	Calculée
Irrigation	Aucune	Calculée	Aucune
Variété	Soisson	EVK	Elma
Labour	20 septembre	12 avril	10 mai

Tableau 4.2 : Paramètres d'entrée de la simulation ORCHIDEE-STICS.

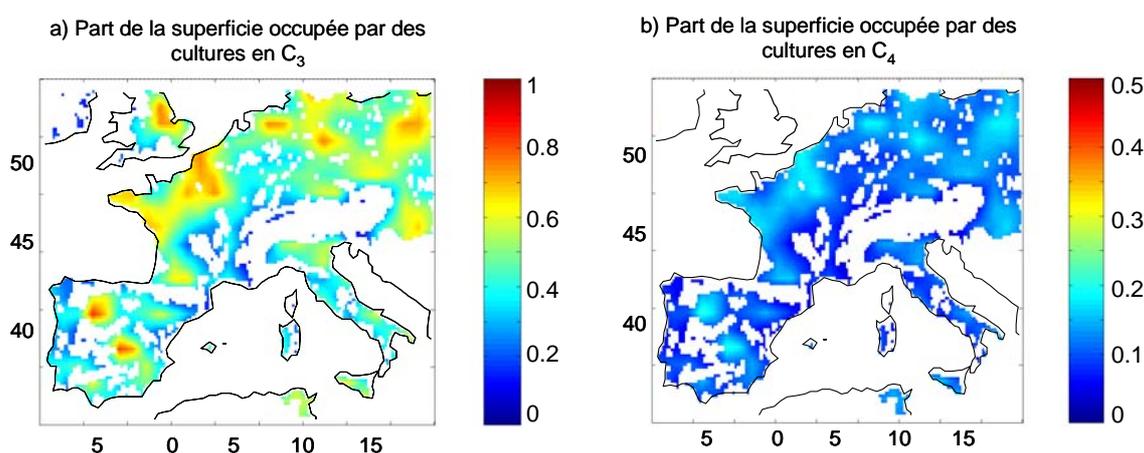


Figure 4.1 : Répartition des cultures : (a) en C<sub>3</sub>; (b) en C<sub>4</sub>. Cette carte a été obtenue en projetant sur la carte CORINE les statistiques de cultures de la FAO. Les zones blanches correspondent aux zones où la fraction des PFTs agricoles est inférieure à 15 %.

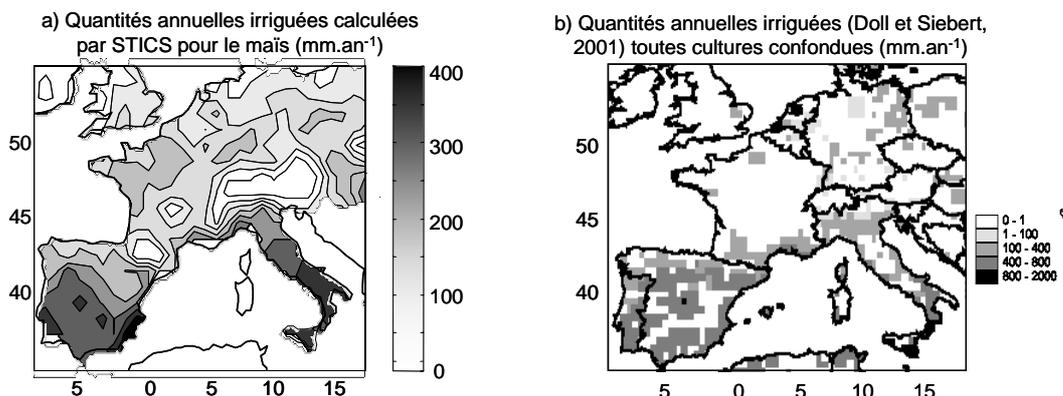
## 4.3 Validation d'ORCHIDEE-STICS à l'échelle de l'Europe

### 4.3.1 Evaluation des irrigations calculées par STICS pour le maïs

La comparaison des irrigations calculées par STICS avec les données ne concerne que le maïs, car le blé et le soja ne sont pas irrigués. Les résultats suivants peuvent être dégagés :

- Pour la France, les irrigations annuelles calculées par STICS varient entre 100 à 200  $\text{mm.an}^{-1}$ , alors que les valeurs de Doll et Siebert (2001) sont quasiment nulles sauf dans le Midi méditerranéen (100  $\text{mm.an}^{-1}$ ). Ces données considèrent l'ensemble des cultures, et ne tiennent pas compte du fait que le maïs a des besoins en eau plus élevés que les autres cultures (Ramade, 1995) (figure 4.2). L'irrigation du maïs s'est généralisée récemment dans le sud-ouest de la France ainsi que dans la région Poitou-Charentes (Prévoit, 1999) et les données récentes de l'IFEN (IFEN, 2002) estiment les quantités d'irrigation pour le maïs grain à 300  $\text{mm.an}^{-1}$  (en moyenne sur la France) ; un apport de 420  $\text{mm.an}^{-1}$  a été fourni au maïs du site de Poitou-Charentes en 1996.
- Pour l'Espagne, les irrigations calculées par STICS sont comprises entre 200 et 350  $\text{mm.an}^{-1}$  du nord au sud, les valeurs de Doll et Siebert se situent entre 100 et 400  $\text{mm.an}^{-1}$  du nord au sud). Ces quantités semblent sous-estimées puisque le maïs est irrigué entre 300 et 650  $\text{mm.an}^{-1}$  (données sur le delta de l'Ebre aux environs de Valence) (Porcedu et Caliandro, 1990).

En résumé, les quantités d'irrigation calculées par STICS avec le seuil de déclenchement des irrigations prescrit par défaut apparaissent sous-estimées. Les résultats auraient été plus réalistes si nous avons effectué une nouvelle simulation avec ce seuil relevé à 0.95, mais nous avons eu connaissance des quantités effectivement irriguées en France trop tardivement.



### 4.3.2 Comparaison des rendements simulés avec les données de la FAO

Les rendements par pays fournis par la FAO (FAO, 2002) seront utilisés comme données de validation. Cependant, les rendements ne sont pas simulés par ORCHIDEE-STICS, nous les approximerons directement par la biomasse des compartiments « fruits » et « réserves ». Les trois pays les plus petits (Belgique, Suisse et Autriche) ont été négligés, en raison de leur faible superficie : trois mailles pour la Suisse, six pour la Belgique et l'Autriche.

#### a) Cas du blé d'hiver (figure 4.3a) :

- Pour l'Europe du Nord-Ouest (France, Royaume-Uni, Allemagne, Pays-Bas), les rendements simulés sont en bon accord avec les données (écart inférieur à 10 %). Les conditions culturales sont voisines de celles du site de calibration de Grignon (chapitre 3) et ces pays sont rarement affectés par des épisodes de sécheresse.
- Les rendements sont surestimés dans les pays d'Europe du sud (Espagne, Portugal, Italie). Ceci est probablement dû aux accidents physiologiques comme l'échaudage non pris en compte dans le modèle. L'échaudage est un dessèchement du grain sous l'effet des températures élevées (34 à 37°C suivant les espèces). Les températures maximales observées dépassent en effet 34°C sur une grande partie de l'Espagne pendant la période de remplissage des grains (figure 4.4). Dans la réalité, des variétés plus résistantes à l'échaudage et à la sécheresse sont utilisées en Espagne et en Italie, comme *Trida* (blé de printemps) ou du blé dur (Magdelaire (2002) ; A. Iglesias, communication personnelle). Ces variétés ont un cycle plus court, qui est terminé avant les fortes chaleurs. La période de remplissage des grains étant écourtée, la NPP annuelle est plus faible.
- Pour le Portugal, les rendements de la FAO sont très faibles, les valeurs sont comparables à celles récoltées en France au début du siècle (cf. chapitre 5). La culture du blé au Portugal découle d'une action politique datant des années 1940 de mise en valeur des terres pauvres et sèches du sud (FAO, 2000). L'essentiel de la production de blé y est encore concentré à l'époque actuelle. Précisons que cette politique d'usage des sols concerne uniquement le blé, mais pas le maïs ou le soja. Dans notre simulation, cela n'est pas pris en compte, et nous avons réparti le blé sur l'ensemble des terres arables. La carte des rendements montre un gradient Nord-Sud important, que l'on peut mettre en parallèle avec le gradient des précipitations. Si l'on ne considère que les points de grille du sud, le rendement simulé est égal à 2.89 t.ha<sup>-1</sup> (partie hachurée sur le graphique) : cette valeur est plus faible que sur l'ensemble du pays (4.84 t.ha<sup>-1</sup>) mais reste surestimée par rapport aux données (1.61 t.ha<sup>-1</sup>). Cette différence résiduelle résulte des mêmes causes qu'en Espagne et en Italie.
- Les rendements sont surestimés en Hongrie. Les pratiques agricoles y sont moins performantes qu'en Europe de l'Ouest. Pour l'année 2000, en moyenne sur l'ensemble de la Hongrie, les quantités annuelles de fertilisants utilisés sont de 48 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, c'est-à-dire trois fois moins importantes que celles simulées par STICS (160 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) (EC, 2002).

#### b) Cas du maïs (figure 4.3b) :

- Les rendements simulés sont sous-estimés de 25% en moyenne sur l'Europe. Plusieurs causes peuvent être avancées pour expliquer ces différences. Les quantités d'irrigation calculées par STICS sont trop faibles (cf. 4.3.1), ce qui sous-estime les rendements. L'écart entre modèle et données est plus accentué dans les pays exposés aux sécheresses (Espagne et Italie en particulier).

- Sur l'Europe, le LAI moyen simulé est inférieur aux valeurs simulées sur les sites de calibration, qui sont représentatives des conditions moyennes. Le LAI maximum moyen est de 3.47, alors qu'il atteint 5.0 sur le site Poitou-Charentes.
- L'irrigation n'est pas la seule explication puisque les rendements sont aussi sous-estimés sur des régions où aucun stress hydrique n'est simulé dans les deux modèles, comme en Allemagne ou aux Pays-Bas. Dans ORCHIDEE, la réponse de la photosynthèse du maïs à la température est la même que pour les herbacées naturelles en C<sub>4</sub>, c'est-à-dire des herbacées principalement tropicales. Dans la réalité, la culture du maïs-grain a récemment pu être étendue vers le nord grâce à la mise au point de nouvelles variétés ayant des besoins thermiques moins élevés, comme SJP (Prévot, 1999). Cette différence peut expliquer que la NPP et les rendements soient sous-estimés par le modèle.
- La longueur du cycle végétatif n'est pas sous-estimée, car une variété de cycle long (EKV) a été choisie et la date butoir est atteinte (cf. 4.4.3). L'allocation vers les grains semble aussi réaliste : l'indice de récolte (le rapport entre la biomasse des grains et la biomasse aérienne totale) vaut 0.45, ce qui est comparable aux données de la bibliographie, comprises entre 0.46 et 0.55 suivant les variétés (Mazoyer, 2002).
- Les rendements sont réalistes pour le Portugal et la Hongrie. Ces deux pays connaissent les rendements observés les plus faibles car les pratiques agricoles sont moins optimisées que pour les autres (comme pour le blé).

c) Cas du soja (figure 4.3c) :

- Les rendements simulés sont surestimés en France et en Allemagne. Dans le modèle, la réponse de la photosynthèse au rayonnement est identique pour le blé et le soja, or, dans la réalité, l'efficacité de conversion annuelle du soja (1.38) est inférieure d'environ 16% à celle du blé (1.63) (O. Bethenod, communication personnelle). Afin de simuler la photosynthèse du soja de manière plus réaliste, on peut envisager de faire varier la sensibilité de la photosynthèse à la lumière dans le modèle.
- Les rendements les plus élevés sont observés en Italie (3.50 t.ha<sup>-1</sup>). Les rendements simulés pour l'Italie diffèrent peu de ceux de l'Allemagne et de la Hongrie. Dans ORCHIDEE-STICS, la réponse de la photosynthèse à la température est la même que pour le blé. En réalité, le soja a des besoins thermiques plus élevés que ceux du blé ; en conséquence, ses paramètres correspondent aux cultures de printemps, comme le maïs : la température minimale-seuil est de 8°C (au lieu de 0°C), la température optimale est de 27°C (au lieu de 23°C). En conséquence, les rendements du soja sont plus élevés dans les pays plus chauds si les conditions hydriques ne sont pas trop contraignantes. En outre, l'essentiel de la production de soja d'Italie est concentré dans la plaine du Pô (R. Valentini, communication personnelle), très fertile et irriguée. Dans cette simulation, le soja a été réparti sur tout le pays et n'a pas été irrigué. Si nous considérons uniquement les quatre pixels de la plaine du Pô, les rendements simulés sont plus élevés (3.93 t.ha<sup>-1</sup> au lieu de 3.03 t.ha<sup>-1</sup>, partie hachurée sur le graphique).
- Les rendements observés sont moins élevés en Espagne qu'en Italie. Cette différence peut être expliquée en partie par les pratiques culturales : le soja est cultivé à la fois dans les plaines fertiles et irriguées du delta de l'Ebre et du Guadalquivir, mais aussi en Castille dans des conditions plus difficiles (terrains moins profonds et non irrigués) (A. Iglesias, communication personnelle).
- Les rendements sont plus faibles en Allemagne qu'en France, aussi bien dans le modèle que dans les observations, en raison de températures plus basses sur

l'ensemble de la saison de croissance. D'ailleurs, le soja ne se développe pas dans le nord de l'Allemagne, aussi bien dans le modèle que dans la réalité (P. Smith, communication personnelle).

- Les plus faibles rendements observés ( $1.3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) se situent en Hongrie. Comme déjà constaté, pour le blé et le maïs, les pratiques agricoles y sont moins optimisées, ce qui explique ces rendements plus faibles.

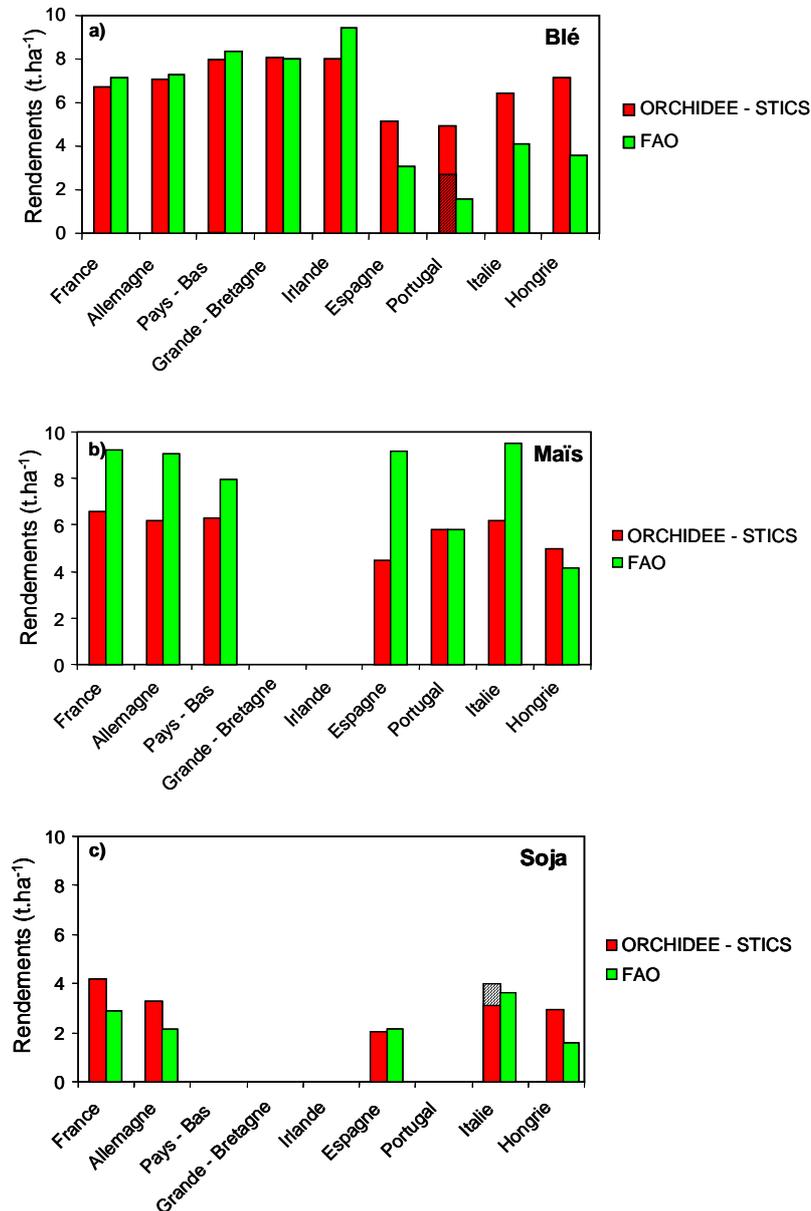


Figure 4.3 : Comparaison des rendements simulés (en  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de matière sèche), par ORCHIDEE-STICS avec les statistiques de la FAO : (a) pour le blé d'hiver (la partie hachurée représente les rendements simulés au Portugal en considérant uniquement les mailles de la moitié sud du pays.); (b) pour le maïs ; (c) pour le soja, la partie hachurée représente le rendement simulé en considérant uniquement les 4 pixels de plaine du Pô.

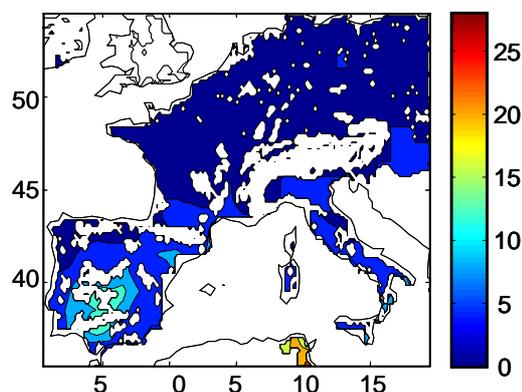


Figure 4.4 Nombre de jours où le risque d'échaudage des grains est important (la température maximale de l'air dépasse 34 °C) pendant la période de remplissage des grains du blé (climatologie : année 2000). Le nombre le plus élevé se situe en Castille-la-Manche (13 jours).

En résumé, les rendements simulés semblent globalement réalistes, compte tenu des hypothèses très simplificatrices que nous avons émises. Ces comparaisons ont mis en évidence plusieurs pistes d'améliorations à apporter au modèle :

- dans le cas du blé, introduire l'échaudage calculé par STICS (version 5) et le forcer dans ORCHIDEE au niveau de l'allocation des grains ;
- dans le cas du maïs, augmenter les doses d'irrigation calculées par STICS, et prendre en compte les nouvelles variétés moins exigeantes en chaleur ;
- dans le cas du soja, améliorer la réponse de la photosynthèse à la température et au rayonnement.

#### 4.3.3 Comparaison des indices foliaires simulés avec des données de télédétection.

Les LAI simulés seront comparés avec les données de FPAR (Fraction du Rayonnement Photosynthétiquement Actif absorbé par le couvert végétal) de la base de données MODIS (Myneni *et al.*, 2002). Le FPAR se déduit du LAI simulé à l'aide de la relation suivante (tableau 4.3) :

$$\text{FPAR} = 1 - e^{(-k * \text{LAI})} \text{ où } k = 0.5 \quad (4.1)$$

FPAR	0	0,049	0,095	0,221	0,393	0,528	0,632	0,713	0,777	0,826
LAI	0	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5

Tableau 4.3 Correspondances entre les valeurs de FPAR et de LAI.

Les longueurs d'onde se situent dans le spectre d'absorption de la chlorophylle, c'est-à-dire entre 400 et 700 nm. Les années considérées diffèrent : les données satellites MODIS correspondent à l'année 2002 et les simulations sont réalisées avec la climatologie de l'année 2000. Les données de FPAR ont été interpolées par N. Viovy, à la résolution du degré, au pas de temps mensuel. Nous considérons uniquement les PFTs agricoles. Nous analyserons plus particulièrement les régions les plus agricoles (bassin parisien, nord de l'Allemagne, le bassin de Londres). Pour mettre en valeur les différences, trois mois (janvier, juin et septembre) représentatifs du cycle saisonnier ont été choisis. Sur la figure 4.5a, sont présentés, de gauche à droite : les FPAR des données MODIS, et simulé par ORCHIDEE-STICS (pour le blé, le maïs et le soja) et par ORCHIDEE standard (PFTs agricoles uniquement). Sur la figure 4.5b, le FPAR simulé pour chacune des cultures considérée (blé,

maïs, soja) est confronté aux données, en ne sélectionnant que les pixels les plus agricoles de la zones (plus de 65% de la superficie est occupée par des cultures).

*a) Comparaison à l'échelle de l'Europe*

**Janvier :**

- Il n'y a pas de données satellitales au-delà du 51°N, les rayons du soleil étant trop obliques à cette époque sur ces régions, pour permettre des mesures fiables.
- Le blé a commencé son cycle, mais il est à l'état végétatif, le LAI se situe autour de 0.3 et le FPAR est inférieur à 0.1.
- Le soja et le maïs ne démarrent leur cycle qu'au milieu du printemps, le sol est nu.
- Dans ORCHIDEE standard, les cultures sont approximées par des prairies quasi pérennes, le LAI est surestimé (compris entre 3 et 4), d'où un FPAR plus élevé que celui de MODIS (autour de 0.8).

Pour résumer, les FPAR (et donc les LAI) simulés sont plus réalistes avec la représentation améliorée des cultures. Les FPAR simulés sont toutefois sous-estimés sur l'ouest de la France et sur le Portugal (compris entre 0.6 et 0.7 dans les données). Ceci semble être la conséquence de l'importance relative des superficies occupées par les cultures fourragères comme la luzerne qui sont pérennes. De plus, nous avons approximé l'ensemble des cultures d'hiver par du blé, mais d'autres comme le colza ont un développement foliaire hivernal plus important (LAI voisin de 1).

**Juin :**

- Les FPAR de MODIS sont partout élevés (généralement compris entre 0.85 et 0.95, soit des LAI supérieurs à 3.8). Le blé est son plein développement.
- Les FPAR simulés pour le blé sont partout élevés (supérieurs à 0.9) : le blé est à son maximum de développement foliaire. Ces valeurs sont généralement en accord avec les données sauf sur le sud de l'Europe où elles sont surestimées. Nous avons déjà mis en évidence les rendements du blé surestimés sont trop élevés dus au fait que les accidents comme l'échaudage n'étaient pas pris en compte dans le modèle. Cependant l'échaudage diminue l'allocation vers les grains mais modifie peu l'indice foliaire. Il est également probable (cf. 4.3.1) que le stress hydrique ne soit pas accentué. En effet la profondeur du sol est constante en tous points de notre domaine d'application, et est prescrite à 2 m. Cette valeur est probablement trop importante pour le centre de l'Espagne, les réserves hydriques maximales simulées sont donc surestimées.
- Les FPAR simulés pour le maïs et le soja sont beaucoup plus faibles, car ces cultures sont au début de leur période de croissance. On remarque que la culture a démarré son cycle sur les régions les plus chaudes du sud de l'Espagne. Le cycle du soja est un peu en avance sur celui du maïs (FPAR plus élevés).
- Le FPAR des prairies reste élevé tout au long de l'année.

## Septembre :

- Les FPAR de MODIS restent élevés et sont le plus souvent compris entre 0.70 et 0.88. Les valeurs sont plus faibles sur les grandes plaines céréalières (bassin parisien, est de l'Angleterre, nord de l'Allemagne) car les cultures d'hiver ont terminé leur cycle et donc une partie des parcelles sont nues.
- Les FPAR simulés pour le blé sont quasiment nuls car il a été récolté.
- Les FPAR simulés pour le maïs sont élevés (environ 0.7 sur la majeure partie de l'Europe). Les valeurs sont cependant plus faibles au sud de l'Europe car la sénescence est déjà commencée. Le soja a débuté sa sénescence ce qui explique les FPAR sont plus faibles que ceux du maïs d'environ 20 à 30%. Les FPAR restent élevés avec Ostd puisque les herbacées sont pérennes.
- Par rapport aux données, les FPAR sont surestimés sur les grandes plaines agricoles du Nord (comme le bassin parisien) car les cultures d'hiver y sont dominantes. Plus au sud (plaine du Pô) les FPAR du maïs sont comparables aux données MODIS : les cultures de printemps y sont dominantes. On pourrait faire la même remarque pour le bassin aquitain (FPAR de MODIS voisin de 0.8) mais les FPAR simulés pour le maïs et le soja.

C'est en septembre que les différences entre les régions où les cultures d'hiver sont dominantes (bassin parisien) et celles où elles coexistent avec des cultures de printemps (plaine du Pô, bassin aquitain) sont les plus marquées.

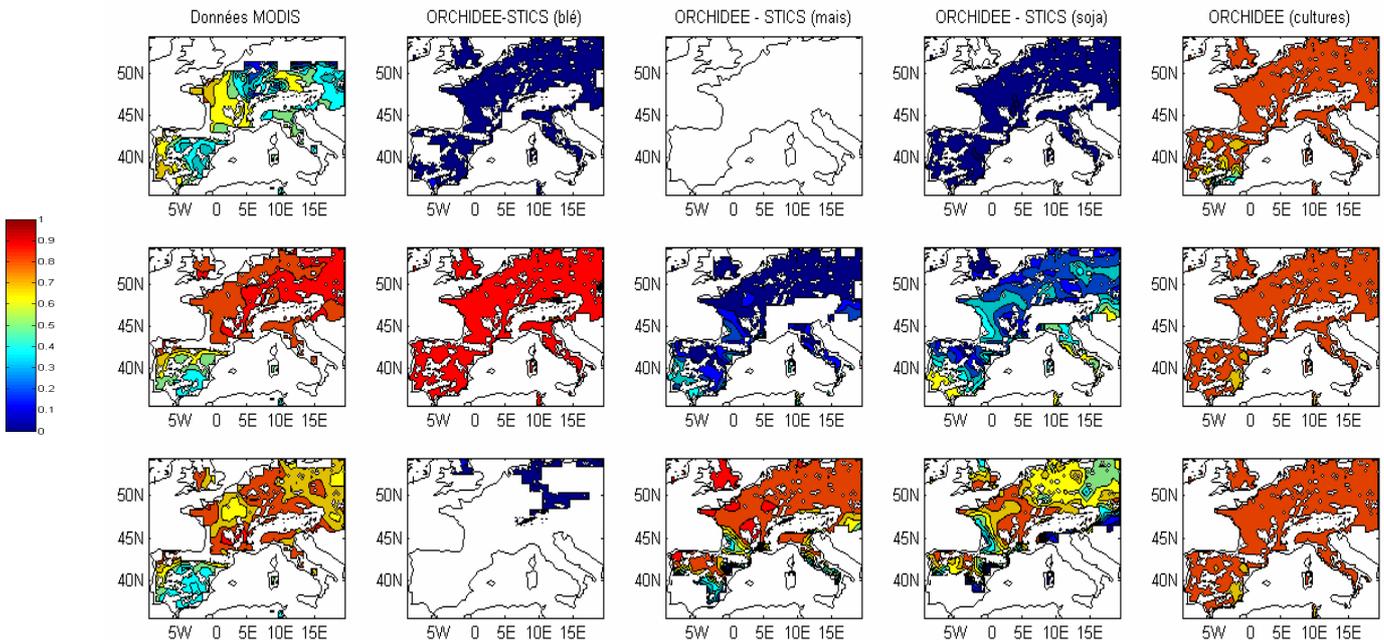


Figure 4.5a : FPAR issus des données MODIS (1<sup>ère</sup> colonne) et simulés par ORCHIDEE-STICS : pour le blé (2<sup>ème</sup> colonne), pour le maïs (3<sup>ème</sup> colonne), et le soja (4<sup>ème</sup> colonne) et par ORCHIDEE standard (5<sup>ème</sup> colonne). Les mois présentés sont janvier (1<sup>ère</sup> ligne), juin (2<sup>ème</sup> ligne) et septembre (3<sup>ème</sup> ligne).

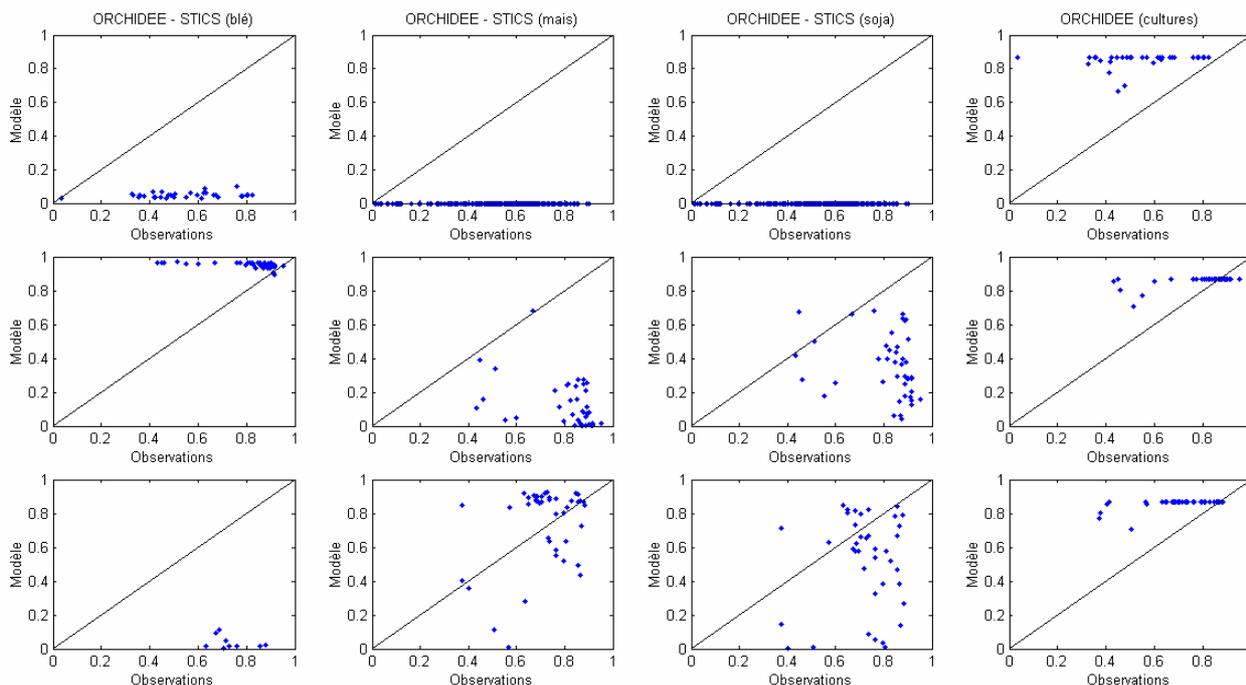


Figure 4.5b : Comparaison des FPAR observés et simulés : par ORCHIDEE-STICS : pour le blé (1<sup>ère</sup> colonne), pour le maïs (2<sup>ème</sup> colonne), pour le soja (3<sup>ème</sup> colonne) ; par ORCHIDEE standard (4<sup>ème</sup> colonne). Les mois considérés sont janvier (1<sup>ère</sup> ligne), juin (2<sup>ème</sup> ligne) et septembre (3<sup>ème</sup> ligne).

### b) Comparaison sur le bassin parisien et le bassin aquitain

Cette étude a été approfondie sur les deux grandes régions agricoles de France. Un pixel du bassin parisien et un autre du bassin aquitain (tableau 4.4 et figure 4.6) ont été choisis. La part de la superficie occupée par les PFTs agricoles est la plus importante de notre domaine d'étude (jusqu'à 78 %) sur le bassin parisien, les améliorations apportées par le couplage avec le modèle STICS seront ainsi mises en évidence.

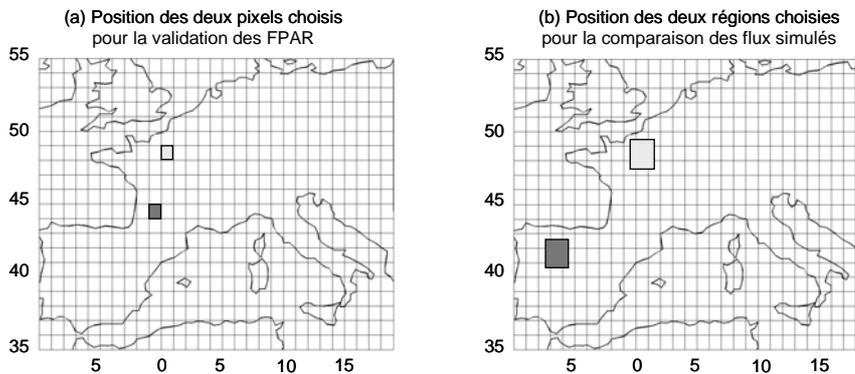


Figure 4.6 : (a) Les deux pixels choisis pour la comparaison des FPAR simulés avec les données MODIS : le bassin parisien (en gris clair) et le bassin aquitain (en gris foncé) (cf. figure 4.7) ; (b) Les deux régions choisies (4 pixels) : bassin parisien (en gris clair) et la Castille-Léon (en gris foncé) pour la comparaison des flux simulés.

Région	Latitude	Longitude	% de PFTs agricoles en C <sub>3</sub>	% de PFTs agricoles en C <sub>4</sub>	Température moyenne (°C)
bassin parisien	48°N	3°E	69	9	11.1
bassin aquitain	44°N	1°E	56	7	13.2

Tableau 4.4 Caractéristiques des deux pixels choisis pour la comparaison des FPAR simulés et observés.

Cette comparaison fait ressortir plusieurs points importants (figure 4.7) :

- Sur les deux sites, l'amplitude du cycle saisonnier du FPAR des cultures est plus grande que celle des herbacées naturelles. La phase du cycle saisonnier se déplace de mai (OSblé) à août (OSsoja). Le maxima d'OSblé (0.90) est plus élevé que celui d'OSsoja (0.86).
- Sur le bassin parisien, le cycle saisonnier du FPAR d'OSblé apparaît le plus réaliste car les cultures d'hiver y sont prédominantes. Les FPAR sont sous-estimés pendant la période hivernale car il est probable que d'autres cultures d'hiver sont utilisées comme le colza qui a un LAI hivernal plus élevé que celui du blé (voisin de 1 au lieu de 0.3) (O. Bethenod, communication personnelle).
- Sur le bassin aquitain, la récolte du blé a lieu 10 jours avant le bassin parisien, celle du soja 17 jours avant. Sur le bassin aquitain, les FPAR restent élevés tout l'été car les cultures de printemps sont plus abondantes qu'en région parisienne, le cycle saisonnier moyen résultant est plus long.

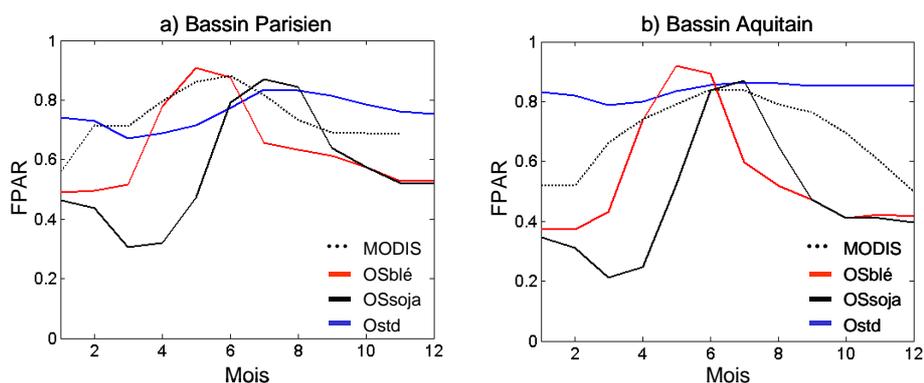


Figure 4.7 : FPAR (moyennes mensuelles) simulés par ORCHIDEE-STICS blé d'hiver (en rouge), ORCHIDEE-STICS soja (en noir, trait plein), ORCHIDEE (en bleu) et données satellitaires MODIS (en noir, trait pointillé) : (a) pour le bassin parisien (48°N, 3°E) ; (b) pour le bassin aquitain (44°N, 1°E).

En résumé, la phénologie des cultures a été sensiblement améliorée à l'échelle de l'Europe. Il subsiste des points à améliorer comme l'ajout d'un nouveau PFT représentatif des cultures de printemps dans ORCHIDEE pour permettre la coexistence des deux principaux types de cultures sur la même maille.

## 4.4 Etude comparée entre ORCHIDEE et ORCHIDEE-STICS

### 4.4.1 Le cycle saisonnier du LAI plus marqué pour les cultures

En comparant le cycle saisonnier du LAI d'ORCHIDEE-STICS et d'ORCHIDEE, on note que:

- Le blé (figure 4.8) reste à l'état végétatif tout au long de l'hiver et démarre fin février ou début mars. La croissance foliaire est ensuite très rapide et la valeur maximale du LAI (entre

6 et 7) est atteinte à la mi-mai. Les récoltes simulées s'échelonnent entre la fin juin et la fin juillet, suivant les régions.

- Le soja est une légumineuse, et la durée de son cycle est de trois ou quatre mois suivant les régions. Son développement foliaire est plus modeste que celui du blé, le LAI maximum atteint 3.8 sur le site de calibration de STICS situé près de l'INRA d'Avignon (A. Olioso, communication personnelle). Cela explique qu'en moyenne européenne, le LAI maximum du soja soit relativement bas (3.2). De plus, il ne se développe pas dans les mailles situées le plus au nord de notre domaine d'étude (nord de l'Angleterre, nord de l'Allemagne).
- Semé fin avril ou début mai dans le modèle suivant les régions, le maïs est récolté en octobre (figure 4.8). Comme déjà évoqué au sujet des rendements, le LAI maximum (en moyenne sur l'Europe) vaut 3.5, et 4.2 si l'on considère uniquement les mailles où la part occupée par le maïs dépasse 5 %.
- Les courbes de LAI simulé pour le soja et le maïs présentent une décroissance abrupte à la fin du cycle. Cela correspond à la date butoir de STICS pour la fin de cycle de chaque type de culture et de chaque variété. Les dates butoirs du maïs et du soja sont respectivement les jours 270 et 290.
- Le cycle du LAI des herbacées en  $C_3$  est peu marqué. La température de sénescence (prescrite) et le seuil basé sur la somme des températures quotidiennes sont trop bas. Autrement dit, les conditions sont déjà favorables pour démarrer un nouveau cycle avant que la plante soit sénescente.

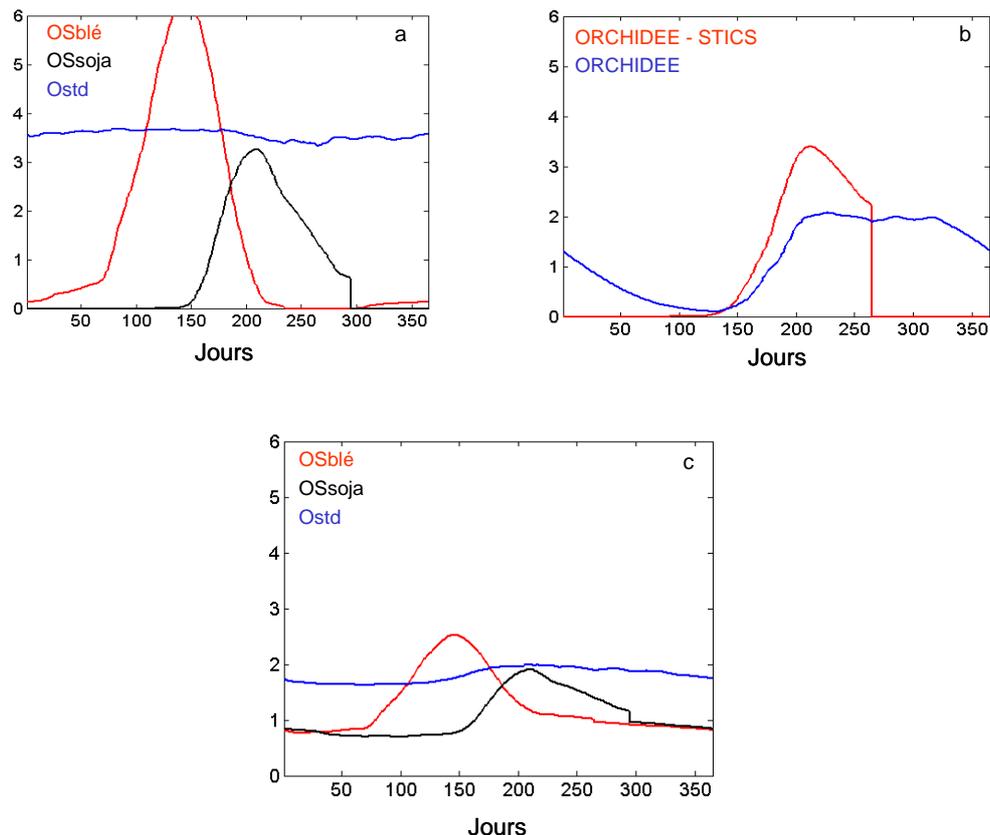


Figure 4.8 : Comparaison des LAI simulés avec OSblé, OSsoja et Ostd (moyenne sur l'Europe) : (a) pour le PFT « agriculture en  $C_3$  » ; (b) pour le PFT « agriculture en  $C_4$  » ; (c) moyenne sur l'ensemble des PFTs. Légende des couleurs : OSblé est en rouge, OSsoja en noir, et Ostd en bleu.

Le cycle saisonnier du LAI a été comparé sur deux régions agricoles contrastées (tableau 4.5) : le bassin parisien et la plaine de Castille-Léon. Ces régions diffèrent de celles choisies pour la comparaison des FPAR, où la fraction des PFTs agricoles était la plus forte. Ici, les deux zones choisies sont plus étendues et couvent 42500 km<sup>2</sup> (soit 4 pixels). Le bassin parisien est la zone la plus agricole de notre étude, les conditions climatiques (température et humidité) sont quasi-optimales pour le blé. La plaine de Castille-Léon est la région la plus agricole d'Espagne, ainsi l'impact de la mise en culture pour des conditions climatiques plus sèches pourra être montré.

	Longitude	Latitude	% de C <sub>3</sub> agricoles	% de C <sub>4</sub> agricoles	Température moyenne	Précipitations annuelles
Bassin parisien	2°E - 4°E	46.5°N - 48.5°N	67	7	11.3	595
Plaine de Castille-Léon	5°W - 3°W	40.5°N - 42.5°N	59	7	14.2	534

Tableau 4.5 Caractéristiques des deux zones agricoles choisies : le bassin parisien et la plaine de Castille-Léon.

Pour les trois simulations (figure 4.9), les LAI sont nettement plus faibles en Castille que sur le bassin parisien. L'effet du stress hydrique explique, au moins en partie, cette différence (figure 4.16). Les températures plus élevées en Castille provoquent le raccourcissement du cycle saisonnier : le démarrage est quasiment synchrone, mais la fin du cycle est plus précoce d'une quinzaine de jours pour le blé et d'une dizaine de jours pour le soja.

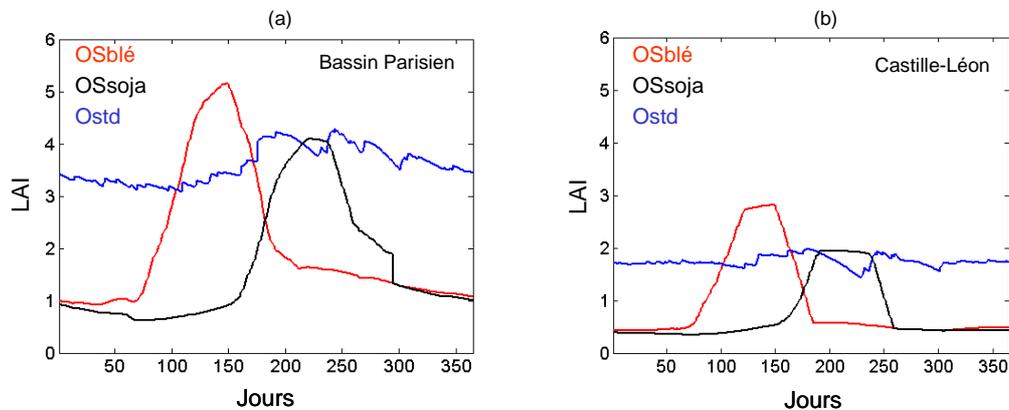


Figure 4.9 : Cycle saisonnier de l'indice foliaire comparé : (a) pour le bassin parisien ; (b) pour la Castille-Léon (unités m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>).

#### 4.4.2 Les réserves hydriques mieux conservées

##### a) Comparaison du cycle saisonnier de l'évapotranspiration (ETR)

Le cycle saisonnier de l'ETR simulé par OSblé et OSstd (figure 4.10) peut être découpé en trois périodes :

- Pendant la période 1 (jours 80 à 170), l'ETR est élevée et est comparable dans OSblé et Ostd. Le LAI d'OSblé est très élevé car le blé est à son maximum de développement foliaire, dans Ostd, le LAI, relativement constant, est proche de 4 comme en hiver. L'ETR

simulé par OSsoja est plus faible de 30% qu'avec Ostd, car le soja n'a pas commencé son cycle végétatif et la terre est nue.

- Pendant la période 2 (jours 170 à 260), l'ETR est plus faible de 22 % dans OSblé que Ostd. Le LAI d'OSblé est nul car cette période correspond à l'intervalle entre la récolte du blé et le semis de la saison suivante, et le LAI d'Ostd est proche de 4. Si l'on compare les composantes de l'ETR, l'évaporation du sol est plus importante dans OSblé que dans Ostd, mais cette différence ne compense pas l'absence de transpiration dans OSblé. Les courbes d'ETR d'OSsoja et Ostd sont quasiment confondues car le soja est à son développement maximum, et les valeurs de LAI sont très proches dans ces deux simulations (figure 4.8c).
- Pendant la période 3 (jours 260 à 80 de l'année suivante), l'ETR simulée reste faible dans les trois simulations même si la différence de LAI est importante (cf. 4.2.1) car où la demande climatique est peu importante et semble être le facteur limitant.

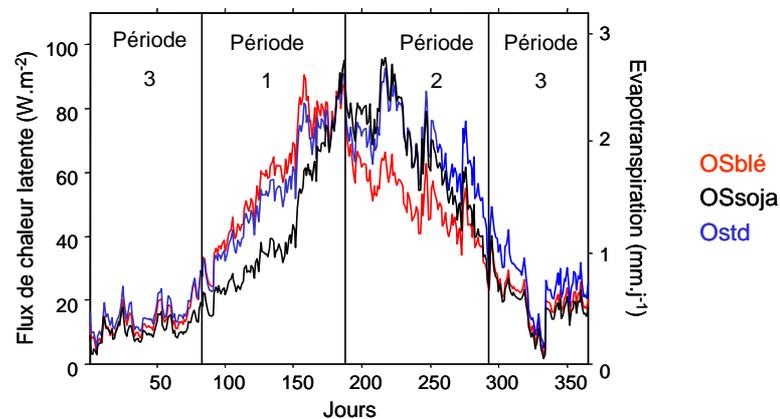


Figure 4.10 : Flux de chaleur latente simulés ORCHIDEE-STICS (blé) (en rouge), ORCHIDEE-STICS (soja) (en noir), ORCHIDEE standard (en bleu). Les trois périodes distinguées dans le texte ont été reportées

Les ETR annuelles d'OSblé et OSsoja sont plus faibles sur l'ensemble de l'Europe que celles d'Ostd (-12 % en moyenne sur l'Europe avec OSblé, -16 % avec OSsoja) (figure 4.11 et tableau 4.7). Les différences les plus marquées se situent sur les régions agricoles et atteignent  $155 \text{ mm.an}^{-1}$  sur le bassin aquitain (soit 27 %) entre OSblé et Ostd, et  $240 \text{ mm.an}^{-1}$  (soit 51 %) sur le bassin parisien entre OSsoja et Ostd.

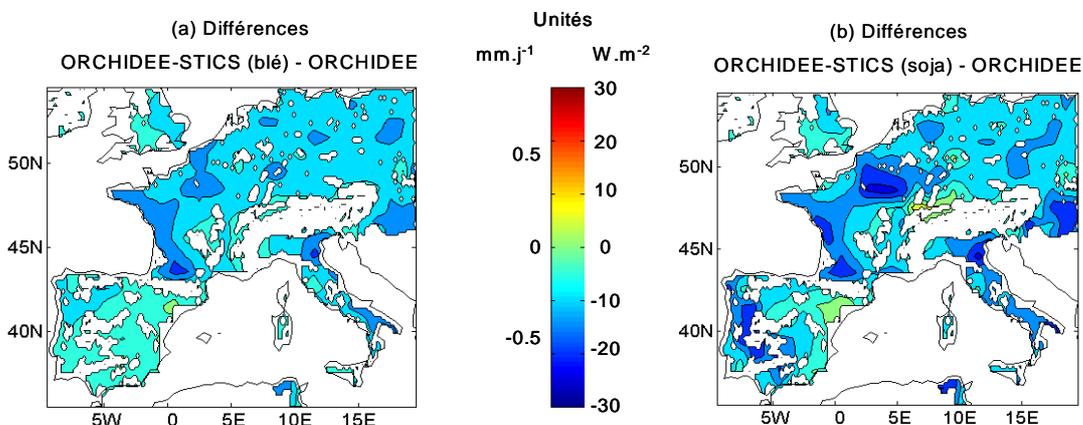


Figure 4.11 : Moyenne annuelle du flux de chaleur latente : (a) différences entre ORCHIDEE-STICS (blé) et ORCHIDEE standard ; (b) différences entre ORCHIDEE-STICS (soja) et ORCHIDEE standard.

Le bilan P – E est positif quelle que soit la simulation (tableau 4.6). L'erreur que l'on fait en ne prenant pas la bonne culture est moins importante que celle que l'on ferait en assimilant une culture à une prairie.

Unités mm.an <sup>-1</sup>	ORCHIDEE standard	ORCHIDEE-STICS blé	ORCHIDEE-STICS soja
ETR annuelle	462.2	406.9	390.6
Précipitations annuelles	792.6	792.6	792.6
P – E	330.4	385.7	402.0

Tableau 4.6 : Comparaison des moyennes annuelles des ETR et des précipitations.

Sur les deux régions agricoles, le bassin parisien (BP) et la plaine de Castille-Léon (CL) (figure 4.12), les différences entre les simulations sont plus marquées que celles obtenues en moyenne sur l'Europe. Les ETR annuelles sont plus faibles en CL ce qui traduit l'effet du stress hydrique même si les températures et le rayonnement sont plus élevés.

- La période 1 (croissance du blé) : pour chaque simulation, l'ETR est plus faible en CL qu'en BP car les LAI et la NPP y sont plus faibles (figure 4.24). Les différences d'ETR entre OSblé et Ostd sont plus importantes en CL (15 % d'écart entre OSblé et Ostd, contre 8.2 % en BP). En CL, les LAI d'OSblé sont proches de 3, soit presque le double d'Ostd (~1.7). En BP, la différence sur les LAI n'est que de 45 % entre OSblé (5.2) et Ostd (3.3).
- La période 2 (croissance du soja) : en BP, l'ETR est plus élevée de 10 % dans la simulation OSsoja qu'avec Ostd. Dans OSsoja, la transpiration est plus élevée. La photosynthèse est plus efficace, en relation avec les plus grandes valeurs prescrites de  $V_{cmax}$  et  $V_{jmax}$ , et la conductance stomatique est plus élevée. Les valeurs de LAI entre OSsoja et Ostd sont proches. En CL, l'ETR est plus élevée avec OSsoja, ce qui est potentiellement révélateur du stress hydrique déjà présent dans Ostd, et qui est simulé plus tardivement dans OSsoja (figure 4.15).
- La période 3 : ETR est plus faible dans les simulations OSblé et OSsoja qu'Ostd car les cultures ont terminé leur cycle végétatif. Les différences entre OSblé et Ostd sont peu accusées, car la demande climatique est faible. Les ETR simulées sont plus fortes en CL qu'en BP, la demande climatique y est plus importante (tableau 4.7). À compter du jour 300, l'ETR d'OSblé est supérieure à celle d'OSsoja, le blé a commencé son cycle végétatif.

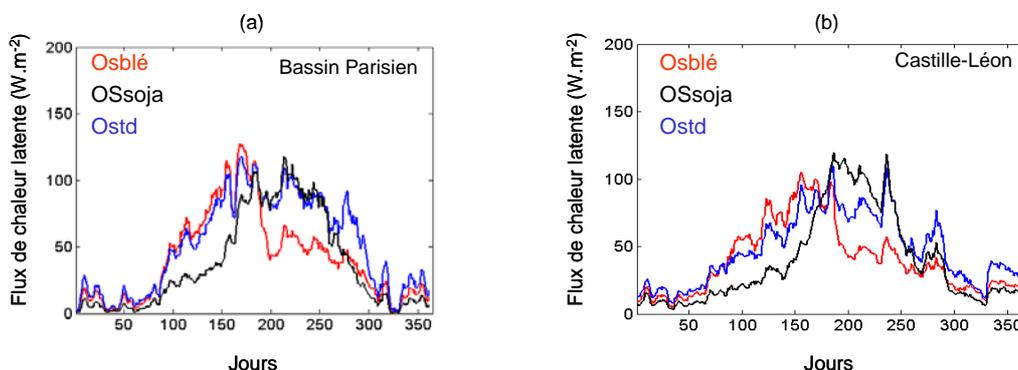


Figure 4.12 : Flux de chaleur latente simulé sur le bassin parisien (a) et la plaine de Castille-Léon (b) par ORCHIDEE-STICS (blé) (en rouge), ORCHIDEE-STICS (soja) (en noir), ORCHIDEE standard (en bleu) (unités  $W.m^{-2}$ ). Pour davantage de lisibilité dans les graphiques présentés, et mettre mieux en évidence les différences, nous avons effectué des moyennes glissantes sur cinq jours.

Région	bassin parisien			Castille Léon		
Simulation	Ostd	OSblé	Ossoja	Ostd	OSblé	OSsoja
Période 1 Croissance blé	68.9	73.7	53.3	47.8	53.2	39.1
Période 2 Croissance soja	97.1	68.9	100.3	78.4	44.9	101.3
Période 3 Sol nu	11.2	7.8	6.8	19.2	13.5	9.8

Tableau 4.7 : Flux de chaleur latente moyen sur les trois périodes du cycle saisonnier pour chacun des deux régions (unités  $W.m^{-2}$ ).

### b) Comparaison des contenus en eau des sols

En moyenne européenne, quelle que soit la culture choisie, les réserves hydriques sont mieux conservées car l'ETR annuelle des cultures est réduite comparée aux herbacées naturelles. Le type de culture (hiver ou printemps) est toutefois important car les réserves hydriques ne sont pas utilisées de la même façon (figure 4.13):

- pour une culture d'hiver comme le blé, le cycle se déroule pendant une période où les précipitations sont abondantes, la demande climatique modérée. Les réserves sont utilisées comme un complément. Le sol est nu pendant l'été, l'évapotranspiration est réduite, ce qui permet de conserver l'eau du sol.
- pour une culture de printemps comme le soja, l'essentiel du cycle a lieu sur la saison estivale, les précipitations sont plus faibles et la demande climatique importante. Une grande partie, voire l'essentiel des besoins en eau de la plante, suivant les régions, est fourni par les réserves. En revanche, le sol est en nu en hiver et au printemps. Comme le sol est proche de la saturation, une partie de l'eau fournie par les précipitations de printemps va ruisseler et sera perdue. Le ruissellement simulé est plus important (+15% de mars à mai). Une augmentation du débit des rivières serait à prévoir.

Fin septembre, à la fin du cycle du soja, les réserves sont situées à un niveau plus bas que si l'on avait utilisé le blé, même si l'ETR annuelle du blé est supérieure à celle du soja. De plus, à cette période, le blé a fini son cycle depuis plus deux mois : l'apport d'eau constitué par les précipitations estivales est resté dans le sol et n'a pas été sollicité pour la plante comme dans le cas du soja. Les pluies assurent le remplissage des réserves d'eau du sol. Ce phénomène est accéléré dans OSblé et OSsoja car l'ETR est faible (le cycle est terminé pour le blé et le soja), il est plus lent dans Ostd car les herbacées étant pérennes, la transpiration continue de puiser l'eau du sol et ralentit le remplissage des réserves.

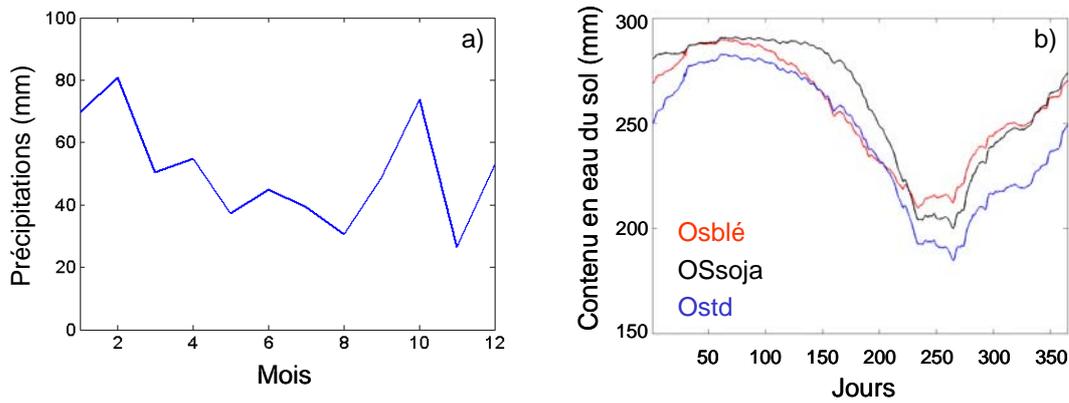


Figure 4.13 : Précipitations mensuelles (mm) (a) et réserves hydriques simulées (b) (en moyenne sur l'Europe) par ORCHIDEE-STICS (blé) (en rouge), ORCHIDEE-STICS (soja) (en noir) ORCHIDEE (en bleu) (unités : mm).

Les réserves hydriques du sol simulées par OSblé et OSsoja ont été comparées à Ostd (figure 4.14). La fin du mois de septembre a été choisie car les réserves hydriques sont à leur niveau de remplissage minimal. Les réserves hydriques d'OSblé sont mieux conservées, en particulier sur les grandes plaines agricoles (jusqu'à 80 mm sur le Bassin aquitain). Celles d'OSsoja sont davantage utilisées entre les parallèles 45 et 50°N (jusqu'à -30 mm en Bretagne), et par contre, elles sont mieux conservées en Espagne où la période de sécheresse a commencé plus tôt, dès le printemps (+100 mm sur le sud-est de l'Espagne).

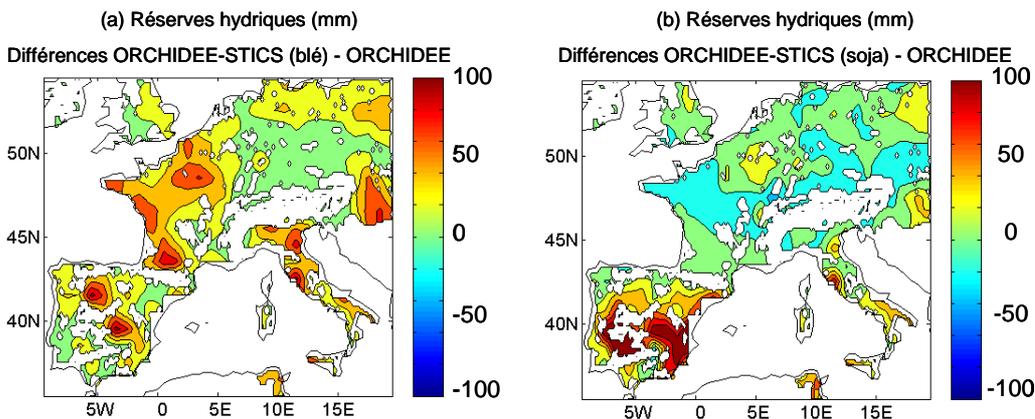


Figure 4.14 : Réserves hydriques simulées pour la fin du mois de septembre : différences ORCHIDEE-STICS (blé) – ORCHIDEE (a.), différences ORCHIDEE-STICS (soja) – ORCHIDEE (b) (unités : mm).

Les variations saisonnières des réserves hydriques simulées sont comparées en parallèle sur le Bassin-Parisien et en Castille-Léon pour les trois simulations (figure 4.15) :

- Durant la période 1 (jours 80 à 170) :
  - Pour OSblé, les réserves hydriques se vident plus vite en CL qu'en BP car elles ne sont que partiellement reconstituées par les précipitations bien que l'ETR y soit plus faible. En BP, les réserves sont pleines jusqu'au début de l'été dans les trois simulations car les précipitations sont suffisantes pour contrebalancer les pertes par ETR. En CL, les réserves se vident plus vite dans OSblé que dans Ostd car l'ETR est plus forte dans OSblé.

- Pour OSsoja, les réserves se maintiennent à leur niveau maximal ; l'ETR simulée est faible sur les deux sites. L'ETR cumulée sur la période est inférieure aux précipitations.
- Durant la période 2 (jours 170 à 260) :
  - Le contenu en eau du sol atteint sa valeur minimale dès le début de l'été, et les précipitations estivales contribuent à le remplir en partie. Les réserves continuent de se vider jusqu'au jour 253 (10 septembre) dans Ostd et OSsoja, en conséquence, la valeur minimale atteinte est plus basse, comprise entre 180 et 190 mm.
  - L'ETR simulée avec OSblé est plus faible que celle d'OSsoja et Ostd, car le cycle du blé est terminé. En BP, jusqu'au 10 septembre, l'état hydrique du sol simulé est très voisin pour OSsoja et Ostd car le développement du soja coïncide avec le moment où l'ETR devient supérieure aux précipitations. Les précipitations sont suffisamment abondantes pour contrebalancer l'ETR jusqu'à la mi-juin. Cette constatation ne penche pas en faveur des cultures de printemps.
- Durant la période 3 (jours 270 à 80 de l'année suivante) :
  - Les pluies d'automne remplissent à nouveau les réserves. En BP, l'écart entre OSblé et Ostd persiste jusqu'à la mi-février de l'année suivante, au moment où les réserves de chaque simulation sont pleines. En CL, ces pluies sont plus tardives (novembre) retardant le remplissage des réserves, en conséquence, le remplissage des réserves d'Ostd n'est pas total pendant la période hivernale (280 mm au lieu de 300 mm en février-mars).

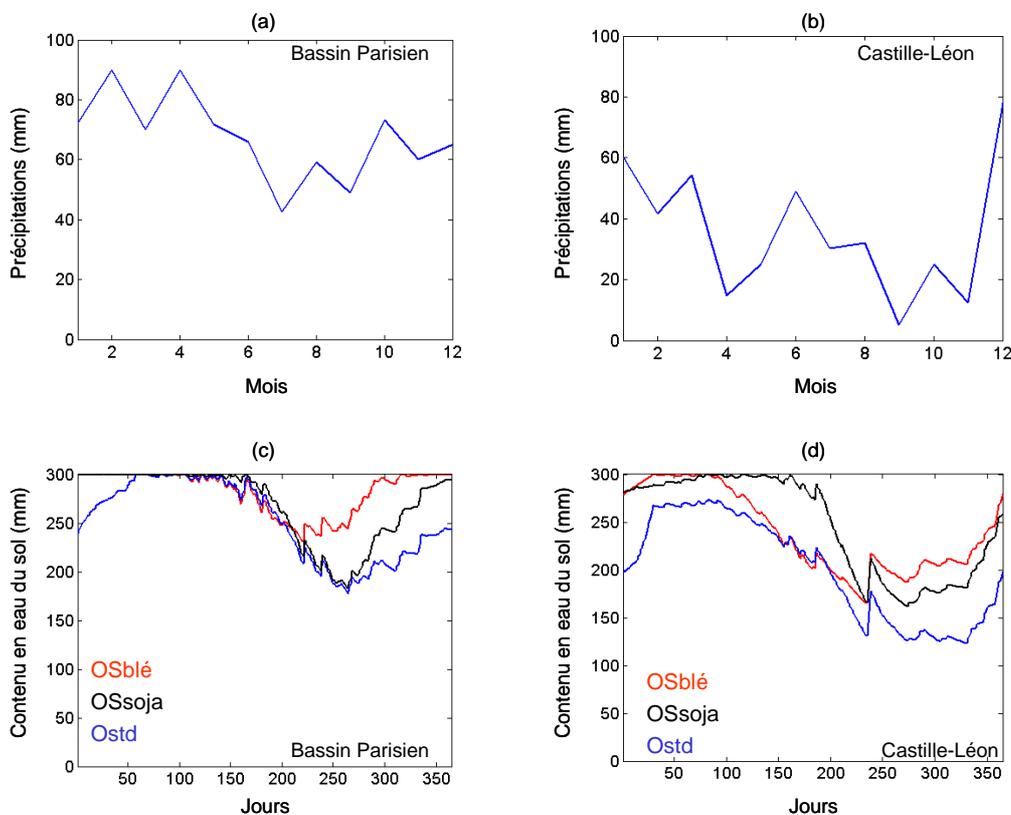


Figure 4.15 : Précipitations mensuelles (a et b) et réserves hydriques simulées (c et d) sur le bassin parisien (a et c) et en Castille-Léon (b et d) (unités : mm) simulées par ORCHIDEE-STICS (blé) (en rouge), ORCHIDEE-STICS (soja) (en noir) ORCHIDEE-standard (en bleu).

En résumé, la culture du blé, centrée sur le printemps, c'est-à-dire, à un moment où les précipitations sont abondantes (sur la majeure partie de l'Europe de l'Ouest), contribue à mieux préserver les réserves hydriques du sol, jusqu'à la fin de l'été. Les cultures de printemps, comme le soja ou bien le maïs, tendent en revanche à vider les réserves hydriques. Il existe cependant une forte variabilité régionale autour de ces conclusions.

#### 4.4.3 Le changement de saisonnalité des termes du bilan d'énergie

Comme l'énergie solaire incidente reçue est la même pour les deux simulations, les variations du flux de chaleur latente mise en évidence précédemment sont compensées par une variation de sens opposé d'au moins un des autres termes du bilan d'énergie (flux de chaleur sensible, rayonnement infrarouge, rayonnement solaire réfléchi).

##### a) Comparaison du flux de chaleur sensible

La comparaison du cycle saisonnier moyen du flux de chaleur sensible entre les trois simulations (figure 4.16) apporte plusieurs éléments intéressants :

- Période 1 : le flux de chaleur sensible simulé est plus faible dans les deux simulations où un couvert végétal est présent (OSblé et Ostd) :  $-12 \text{ W.m}^{-2}$  en moyenne sur l'ensemble de la période, comparé à OSsoja où le sol est nu sur les surfaces agricoles. En revanche, il y a très peu de différences entre les simulations OSblé et Ostd sur cette période. Pourtant, le LAI est différent : il est supérieur à 6 dans OSblé et est voisin de 4 dans Ostd.
- Période 2 : le flux de chaleur sensible est plus élevé ( $+14 \text{ W m}^{-2}$ ) dans la simulation où le sol est nu (OSblé). Cet écart est très voisin de celui constaté sur la période 1 entre OSsoja (sol nu) et Ostd (couvert végétal).
- Période 3 : le flux de chaleur sensible se situe entre 10 et  $20 \text{ W.m}^{-2}$ , que la surface soit recouverte ou non de végétation. C'est l'hiver, la demande climatique est réduite et semble être le facteur limitant.

En résumé, comme pour l'ETR, c'est le remplacement d'un sol nu par un couvert végétal qui affecte le plus le flux de chaleur sensible. En bilan annuel, le flux de chaleur sensible est plus élevé avec OSblé ou OSsoja qu'avec Ostd (figure 4.17). Les différences les plus marquées entre les simulations se localisent sur les grandes plaines agricoles (Bassin parisien, Bassin aquitain). Les différences sont plus accentuées entre OSsoja et Ostd qu'entre OSblé et Ostd, car la période végétative est plus courte dans OSsoja.

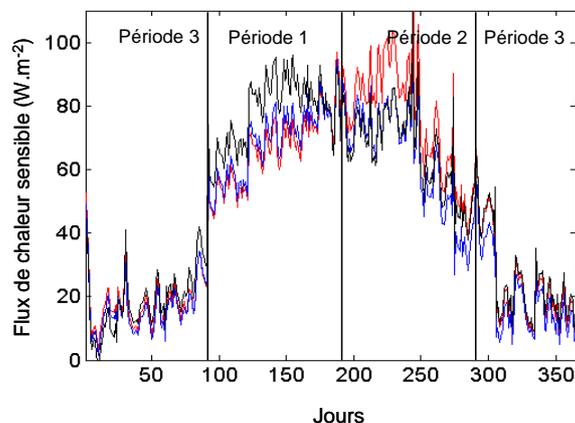


Figure 4.16 : Cycle saisonnier du flux de chaleur sensible (en moyenne sur l'Europe) simulé par ORCHIDEE-STICS (blé) (en rouge), ORCHIDEE-STICS (soja) (en noir) et ORCHIDEE- standard (en bleu) (unités :  $\text{W.m}^{-2}$ ).

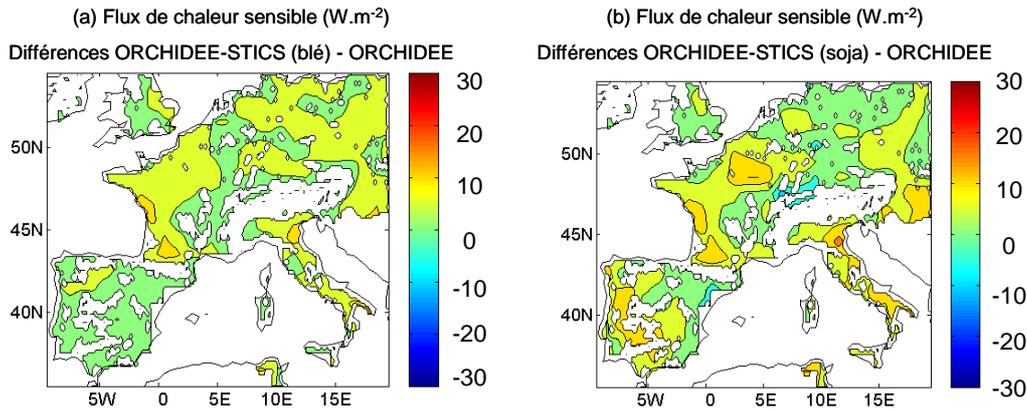


Figure 4.17 : Flux de chaleur sensible (en moyenne annuelle) simulés : (a) différences ORCHIDEE-STICS (blé) – ORCHIDEE-standard ; (b) différences ORCHIDEE-STICS (soja) – ORCHIDEE-standard (unités :  $W.m^{-2}$ ).

Sur les deux régions choisies (Bassin parisien et Castille-Léon), les différences entre les simulations sont plus importantes en BP : le flux de chaleur sensible simulé par OSsoja est plus élevé de 30 % qu’avec Ostd, sur la période comprise entre les jours 80 et 170. L’écart ne dépasse pas 13 % en CL. Sur la période comprise entre les jours 170 et 260, OSblé est plus élevé de 26 % qu’Ostd, l’écart ne dépasse pas 10 % en CL. C’était l’inverse pour le flux de chaleur latente, les différences y étaient plus accusées. En BP, les réserves hydriques sont mieux remplies dans les trois simulations et l’évaporation du sol ainsi que la transpiration restent élevées ; l’eau disponible n’est pas le facteur limitant. Les différences de rayonnement net se répercutent sur le flux de chaleur sensible. En CL, les conditions hydriques sont limitantes, elles diffèrent dans les trois simulations ; les différences de rayonnement net dues à l’albédo se répercutent sur le flux de chaleur latente. Le flux de chaleur sensible est élevé dans les trois simulations (figure 4.18).

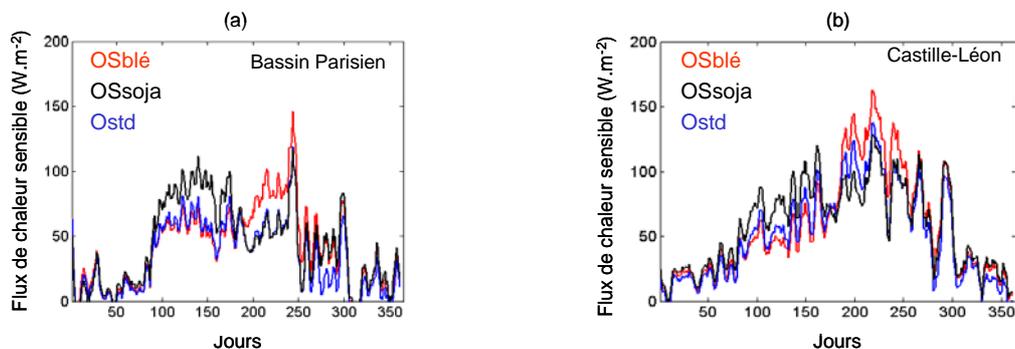


Figure 4.18 : Comparaison du cycle saisonnier simulé du flux de chaleur sensible sur le Bassin parisien (a) et sur la plaine de Castille-Léon (b) simulé par ORCHIDEE-STICS (blé) (en rouge), ORCHIDEE-STICS (soja) (en noir) et ORCHIDEE-standard (en bleu) (unités :  $W.m^{-2}$ ).

#### b) Comparaison des autres termes du bilan d’énergie

En bilan annuel, l’augmentation du flux de chaleur sensible ne compense pas la diminution du flux de chaleur latente (figure 4.19 et tableau 4.8). L’albédo de surface annuel passe de 0.160 (pour Ostd) à 0.174 (pour OSblé) et 0.184 (pour OSsoja). Dans le cas des cultures, il y a une période de sol nu, ce qui n’est pas le cas pour une prairie pérenne. L’albédo annuel est plus élevé dans le cas du soja puisque la période de sol nu est plus longue et que le LAI est plus faible. Une partie plus importante des radiations solaires sera

réfléchi vers l'atmosphère et non absorbée par la surface. Toutefois, ces différences sont faibles en valeur absolue car la variation des flux se concentre sur quelques mois et elle se compense partiellement entre les périodes 2 et 3.

Unités $W.m^{-2}$ (sauf albédo sans unité)			ORCHIDEE- standard	ORCHIDEE- STICS Blé	ORCHIDEE- STICS soja
Flux sortants	Flux turbulents	Flux de chaleur sensible	44.3	48.4	49.3
		Flux de chaleur latente	44.1	38.8	37.3
		TOTAL	88.4	87.2 -1.2	86.6 -1.8
	Rayonnement infrarouge émis		257.1	257.3 + 0.2	256.7 - 0.4
	Rayonnement courtes longueurs d'ondes réfléchi		20.3	21.3 +1.0	22.5 + 2.2
Flux entrants	Rayonnement atmosphérique		238.4	238.4	238.4
	Rayonnement courtes longueurs d'onde incident		127.6	127.6	127.6

Tableau 4.8 : Comparaison des différents termes annuels du bilan d'énergie (unités  $W.m^{-2}$ ).

Une analyse comparable a été refaite en considérant uniquement la période comprise entre les jours 185 et 245 (juillet - août) :

- Les flux turbulents (flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente) sont affectés par le contraste entre le sol nu et la végétation, comme le montrent les différences entre OSBlé et Ostd de  $+12 W.m^{-2}$  (soit 16 %) pour le flux de chaleur sensible, et de  $-17W.m^{-2}$  (soit 22 %) pour le flux de chaleur latente. Comme déjà mentionné, la hausse du flux de chaleur sensible ne compense pas la diminution du flux de chaleur latente. Il y a donc un rééquilibrage entre les autres termes du bilan d'énergie. Les différences sont peu sensibles entre OSsoja et Ostd ( $+1 W.m^{-2}$ ) car les LAI respectifs sont proches.
- Comparé à Ostd, le rayonnement infrarouge d'OSBlé est plus élevé ( $+1.1 W m^{-2}$ ) car la température de surface est aussi plus élevée de  $0.2^{\circ}C$  (section c). Le rayonnement infrarouge d'OSsoja est plus faible ( $-2 W.m^{-2}$ ) comme la température de surface de  $0.4^{\circ}C$ . Ceci s'explique à la fois par l'augmentation de l'albédo ( $1 W m^{-2}$ ) et du flux de chaleur latente ( $1 W m^{-2}$ ).
- Le rayonnement solaire réfléchi d'OSBlé est plus élevé ( $+4.3 W.m^{-2}$ ) associé à un albédo plus important (l'albédo du sol nu est supérieur à celui d'un couvert). C'est l'augmentation de l'albédo qui est responsable de la diminution de l'énergie disponible en surface.

Unités $W.m^{-2}$ (sauf albédo sans unité)			ORCHIDEE standard	ORCHIDEE- STICS Blé	ORCHIDEE- STICS Soja
Flux sortants	Flux turbulents	Flux de chaleur sensible	70.4	82.3	71.1
		Flux de chaleur latente	72.1	55.8	73.0
		TOTAL	142.5	138.1 -5.4	144.1 +1.6
	Rayonnement infrarouge émis		373.9	375.0 +1.1	377.7 -2.1
	Rayonnement courtes longueurs d'ondes réfléchi		33.6	37.9 +4.3	34.1 +0.5
Flux entrants	Rayonnement courtes longueurs d'onde incident		210.2	210.2	210.2
	Rayonnement atmosphérique		310.4	310.4	310.4
Albédo			0.162	0.199	0.171

Tableau 4.9 : Comparaison des différents termes du bilan d'énergie pour la période de développement du soja (comprise entre les jours 185 et 245) (unités  $W.m^{-2}$  sauf l'albédo qui est sans unité).

### c) Comparaison des températures de surface

Sur la période 1, la température est plus basse dans OSblé, d'environ  $0.4^{\circ}C$ , soit  $2 W m^{-2}$ . Comme l'ETR est plus élevée (figure 4.10), une plus grande fraction de l'énergie solaire absorbée sert à évaporer l'eau de la plante, la partie restante disponible pour chauffer la surface est plus faible. Ces différences sont plus importantes sur les grandes régions agricoles (Bassin parisien, est et nord de l'Allemagne). L'impact est plus marqué en Espagne où les températures sont plus basses jusqu'à  $0.7^{\circ}C$ . C'est en Espagne que les différences sur l'ETR entre OSblé et Ostd sont le plus accentuées, jusqu'à +16 % (figure 4.11), entraînant une variation importante de la température de surface.

Durant la période 2, (après la récolte du blé), la température de surface est plus élevée dans OSblé d'environ  $0.4^{\circ}C$ . Comme l'ETR est plus faible dans OSblé, une plus grande fraction de l'énergie solaire absorbée au niveau de la surface est disponible pour chauffer la surface. Cette constatation n'est pas vérifiée sur les régions les plus méridionales, où les températures de surface y sont plus basses avec OSblé. Le rayonnement solaire étant plus important sur ces régions, la différence de rayonnement absorbé (en valeur absolue) est plus importante, comparée à celle des flux de chaleur sensible et latente. La variation d'albédo est importante car il y a un couvert végétal plus sombre avec un albédo plus faible dans Ostd. Le sol est nu et sec avec un albédo plus élevé dans OSblé, donc, une plus grande partie de l'énergie incidente sera réfléchi par la surface et ne sera pas utilisée pour chauffer la surface.

La période 3 est laissée de côté car les différences de température simulées sont peu sensibles.

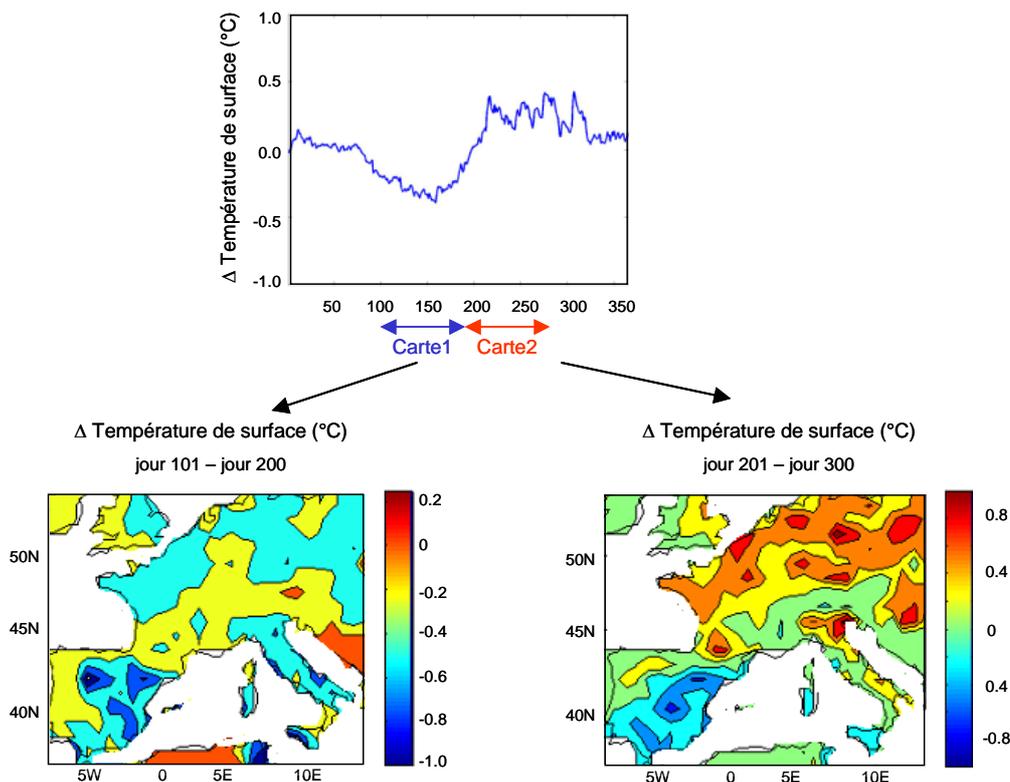


Figure 4.19 : Température de surface : différences entre ORCHIDEE-STICS blé (OSblé) et ORCHIDEE (Ostd) en moyenne sur l'Europe (a) ; en moyenne entre les jours 101 et 200 (b) ; en moyenne entre les jours 201 et 300 (c) (unités  $^{\circ}\text{C}$ ).

Pour la période 1, les températures de surface sont plus élevées dans OSsoja d'environ  $0.1^{\circ}\text{C}$  à  $0.2^{\circ}\text{C}$  que dans Ostd (figure 4.20) : le sol est nu dans OSsoja. Sur la période 2, la température de surface est plus basse dans OSsoja (jusqu'à  $0.4^{\circ}\text{C}$ ). Cette période coïncide avec le développement du soja, l'écart sur la température est le plus important quand le développement du soja est maximum. Cette différence est en partie due à l'effet de l'albédo puisque les différences sur les flux sont peu marquées.

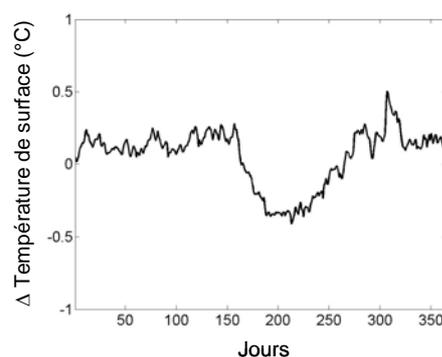


Figure 4.20 : Température de surface : différences entre ORCHIDEE-STICS soja (OSsoja) et ORCHIDEE (Ostd) en moyenne sur l'Europe (unités :  $^{\circ}\text{C}$ ).

En résumé, quel que soit la culture, les températures de surface sont plus basses avec ORCHIDEE-STICS au moment du maximum du développement de la culture : d'avril à juin pour le blé et de juin à août pour le soja.

#### 4.4.4 Les sols agricoles plus pauvres en carbone

##### a) Comparaison des productivités primaires nettes (NPP)

L'analyse des bilans de carbone complète cette étude (la NPP, le flux net et les stocks de carbone du sol). Le cycle saisonnier de la NPP simulé par OSblé et OSsoja est plus accentué. Pendant la période du maximum de développement du blé (jours 130 à 170) (figure 4.21), la NPP journalière simulée d'OSblé est accrue de 25 % comparée à Ostd (respectivement  $3.8 \text{ gC.j}^{-1}$  et  $5.4 \text{ gC.j}^{-1}$ ). Cet accroissement reflète le LAI moyen plus élevé ainsi que la vitesse de photosynthèse qui a été relevée. Les NPP d'OSsoja sont plus faibles comparées à OSblé, car le LAI est plus faible.

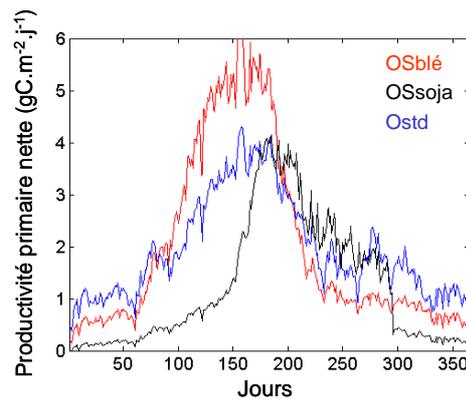


Figure 4.21 : Productivités primaires nettes simulées en moyenne sur l'Europe : OSblé (en rouge), Ostd (en bleu) et OSsoja (en noir).

Les NPP annuelles du blé sont très voisines de celles de la prairie naturelle (tableau 4.9). Il y a une compensation entre la NPP des cultures accrue, mais sur une période végétative courte pour les cultures, et la NPP des prairies répartie sur l'année entière. Cette moyenne dissimule des différences régionales (figure 4.22). Les NPP naturelles estivales sont supérieures à celles du blé sur les régions sous influences océaniques (jusqu'à  $1 \text{ t.ha}^{-1}$  soit 9 %) et méditerranéennes (jusqu'à  $2.4 \text{ t.ha}^{-1}$ ) soit 21 % ; elles sont plus basses sur l'Allemagne. Pour illustrer ces différences, comparons les températures sur deux zones agricoles : la Beauce ( $46.5\text{-}47.5^\circ\text{N}$  -  $3\text{-}4^\circ\text{W}$ ) et la Bavière ( $49.5\text{-}50.5^\circ\text{N}$  -  $5\text{-}6^\circ\text{E}$ ). Les températures sont plus basses en Bavière de  $2.6^\circ\text{C}$  pendant la phase de montaison du blé. La phase de montaison correspond à la croissance très rapide du LAI, et se situe entre les jours 80 et 95 pour la Beauce, et entre les jours 89 et 109 pour la Bavière (retardée d'une dizaine de jours). La vitesse de croissance du LAI et donc sa valeur maximale dépend étroitement des températures de l'air pendant la phase de montaison car la vitesse de croissance du LAI est proportionnelle à la température (chapitre 2). Bien que la phase de montaison dure quatre jours de plus en Bavière, les LAI maxima sont plus forts en Beauce ( $6.1$ ) qu'en Bavière ( $4.2$ ). Sur les régions plus méridionales (Espagne notamment), les précipitations d'été sont faibles, pénalisant les prairies pérennes et les cultures de printemps, qui sont exposées à la sécheresse estivale, comme en Castille-Léon (figure 4.23).

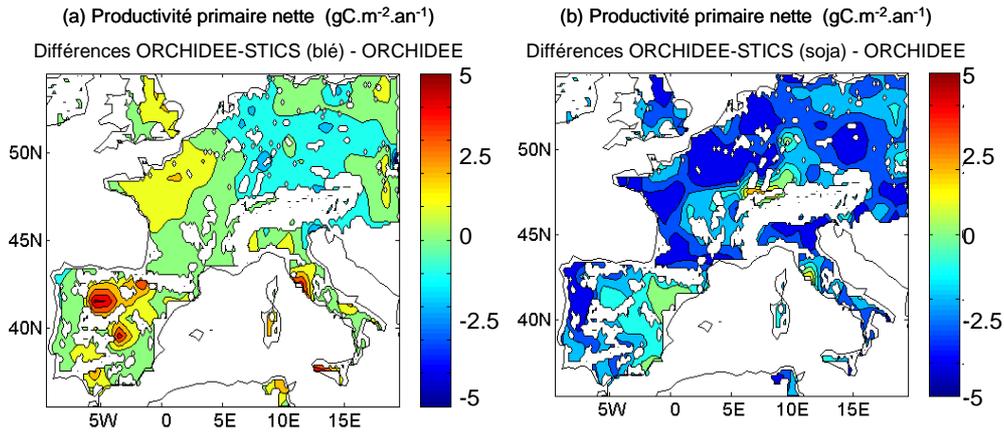


Figure 4.22 Productivités primaires nettes annuelles simulées : (a) différences ORCHIDEE-STICS (blé) – ORCHIDEE standard ; (b) différences ORCHIDEE-STICS (soja) - ORCHIDEE standard.

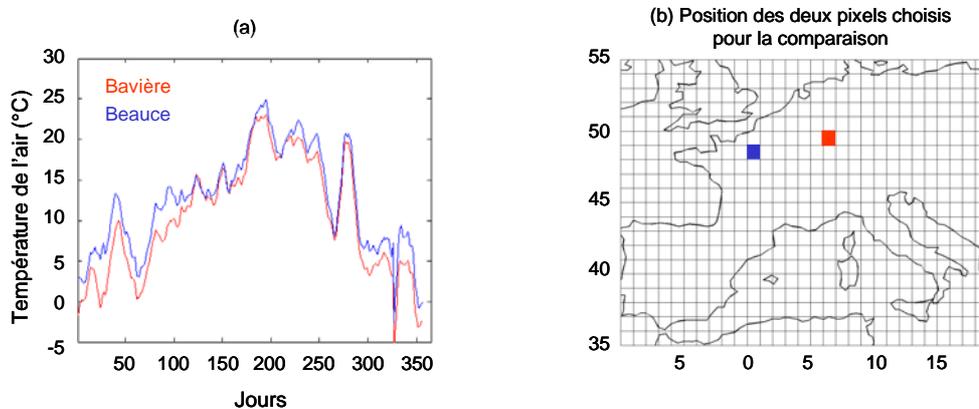


Figure 4.23 : (a) Températures de l'air journalières comparées (moyennes mobiles sur dix jours) en Beauce (en bleu) et en Bavière (en rouge) ; (b) position des deux pixels sélectionnés (mêmes couleurs).

Comme pour le bilan d'énergie, le cycle saisonnier de la NPP est comparé sur les deux régions agricoles précédentes (figure 4.24) :

- Pour la version standard, pendant la période hivernale, la NPP est deux ou trois fois plus élevée en Castille que sur le bassin parisien :  $2.5 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  contre  $0.8 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ . Les conditions climatiques (température et rayonnement) sont plus favorables au développement de la végétation. Les températures maximales sont plus élevées : la moyenne de janvier est de  $11^\circ\text{C}$  contre  $6.5^\circ\text{C}$  ainsi que le rayonnement incident ( $110 \text{ W.m}^{-2}$  contre  $40 \text{ W.m}^{-2}$ ). Les conditions s'inversent dès le printemps entre les deux sites et la NPP devient plus forte sur le bassin parisien. En Castille, les réserves hydriques du sol s'épuisent plus rapidement du fait de l'ETR plus élevée. Le déficit hydrique apparaît dès le jour 130 et les réserves ne sont pas reconstituées par les précipitations (figure 4.15). Sur la période comprise entre les jours 130 et 190, la NPP reste à son niveau hivernal en Castille, soit  $3 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  en moyenne, contre  $5.8 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  en Beauce. Sur la période estivale proprement dite, à partir de début juillet, la NPP demeure faible en Castille, autour de  $2 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  en raison du niveau bas des réserves hydriques.
- Pour OSblé, la NPP est très voisine sur les deux sites pendant la première partie du développement, c'est-à-dire sur la période comprise entre les jours 60 et 130. En revanche, sur la deuxième partie du cycle (jour 130-jour 185), la NPP est nettement supérieure sur le Bassin parisien, quand le LAI est maximum, c'est-à-dire la période comprise entre les jours 150 et 170 : la NPP moyenne sur cette période est de  $13.5 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  sur le Bassin parisien et

de  $7.6 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  en Castille. Cette différence s'explique par le déficit hydrique simulé à partir du jour 130. En effet, la réserve hydrique du sol s'abaisse au-dessous du contenu critique de 220 mm. Cette valeur correspond au seuil de stress hydrique de 0.5 à partir duquel le déficit en eau affecte la photosynthèse dans ORCHIDEE.

- Pour OSsoja, comme pour le blé, les NPP sont très voisines sur les deux régions pendant la première partie du développement, comprise entre les jours 160 et 190. Sur la seconde partie du cycle, la NPP devient très faible (inférieure à  $0.5 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ ), nulle en Castille et se maintient à  $4 \text{ gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$  sur le bassin parisien. Dans le cas de la Castille, le développement de la culture a consommé la réserve hydrique disponible.

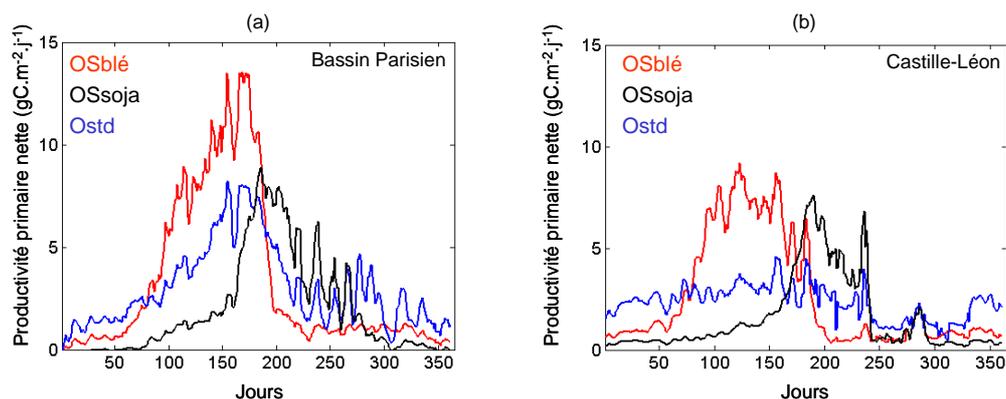


Figure 4.24 : Comparaison des cycles saisonniers de la productivité primaire nette simulés: (a) pour le Bassin parisien ; (b) pour la plaine de Castille-Léon (Espagne) (unités  $\text{gC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ ).

En résumé, cette comparaison a montré l'impact des cultures sur les bilans d'eau et de carbone sur deux zones agricoles européennes contrastées : le bassin parisien où les principaux facteurs limitants sont la température et le rayonnement, et la plaine de Castille où les précipitations sont le facteur limitant de la productivité. L'avantage des cultures d'hiver ressort dans les différentes conditions climatiques, car elles assurent à la fois la productivité la plus importante et une meilleure restitution des réserves hydriques.

#### b) Comparaison des flux nets de carbone

L'amplitude du cycle saisonnier du flux net de carbone (NEE : Net Ecosystem Exchange, en anglais) est plus accusée, avec ORCHIDEE-STICS (quelle que soit la culture pilote choisie) (figure 4.25). On se place ici du point de vue de l'atmosphère (les valeurs positives indiquent une source de carbone). Les grains sont retirés du champ lors de la récolte (chapitre 3) et on considère que la partie exportée se décompose sur place de façon uniforme chaque jour. Cette biomasse est décomposée complètement dans l'année et n'est pas délivrée aux réservoirs de carbone du sol. Pendant la période située immédiatement après la récolte dans OSblé, les cultures sont une source nette, qui résulte de la décomposition de la litière accumulée. La saison estivale est favorable (températures élevées, humidité) à la décomposition rapide de la litière. Le flux de carbone d'OSsoja ne montre des valeurs positives aussi élevées qu'OSblé après la récolte. Les températures sont plus fraîches à la fin octobre, la décomposition est plus lente et plus durable. De plus, les quantités de biomasse transformées en litière sont plus faibles.

Unités t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>	ORCHIDEE standard	ORCHIDEE-STICS blé	ORCHIDEE-STICS soja
NPP	7.14	7.36	5.29
Décomposition des produits récoltés	0	1.59	1.13

Tableau 4.10 : Comparaison des productivités annuelles et du flux de décomposition des produits récoltés.

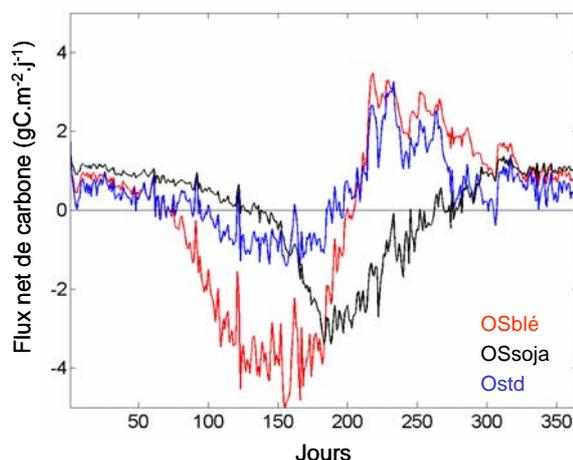


Figure 4.25 : Flux net de carbone simulé par ORCHIDEE-STICS (blé) (en rouge), ORCHIDEE-STICS (soja) (en noir) ORCHIDEE-standard (en bleu) (unités : gC.m<sup>-2</sup>).

### c) Comparaison des stocks du carbone

Nous étudierons les stocks de carbone simulés en les comparant aux mesures sur l'ensemble de la France fournies par Arrouays *et al.*, (2002) (figures 4.26 et 4.27). Nous montrerons ensuite les différences les plus marquées entre les trois simulations. Le calcul du carbone du sol d'ORCHIDEE provient du modèle CENTURY (Parton *et al.*, 1988), (cf. chapitre 2). Trois réservoirs de carbone sont discrétisés avec des constantes de temps de décomposition différentes : environ un an pour le réservoir actif, quelques dizaines d'années pour le réservoir lent, plusieurs centaines d'années pour le réservoir passif.

La comparaison d'ORCHIDEE avec les données d'Arrouays montre que :

- En considérant uniquement les zones agricoles, les stocks simulés sont de 68.4 t.ha<sup>-1</sup> (en moyenne) (tableau 4.11), ce qui est surestimé d'environ 30 % par rapport aux données (40 à 50 t.ha<sup>-1</sup> dans les données). Comme montré au chapitre 3, cet écart est expliqué par le fait que nous n'intégrons pas le labour dans notre modèle. Le labour accélère d'environ 25% la minéralisation de la matière organique. Il oxygène mieux le sol et augmente la surface d'échange entre les particules du sol et l'atmosphère (Smith *et al.*, 2000a). Robertson *et al.* (2000) montrent qu'une terre labourée est en moyenne 30 % plus pauvre en carbone qu'une terre non labourée. Au moment de la récolte, seuls les grains sont exportés, alors qu'en réalité, une partie de la paille est retirée et ne peut pas parvenir aux réservoirs de carbone du sol (Gondé et Jussiaux, 1980).
- À l'échelle de la France, maintenant, les contenus de carbone simulés (figure 4.26) sont relativement homogènes spatialement, et sont compris entre 60 et 80 t.ha<sup>-1</sup>. La carte établie par Arrouays *et al.* (2002) (figure 4.27) résulte de la compilation des très nombreuses mesures ponctuelles sur l'ensemble du pays. Cette carte montre un

gradient prononcé des zones les plus pauvres en carbone (c'est-à-dire les grandes plaines céréalières) avec des stocks compris entre 40 et 50 t.ha<sup>-1</sup> vers les zones forestières et de pâturage ainsi que les montagnes (jusqu'à 90 t.ha<sup>-1</sup>). Les valeurs les plus importantes se situent sur les parties granitiques du Massif Central où la matière organique se décompose lentement (climat frais, sol acide). Ce gradient n'apparaît pas nettement sur notre carte simulée.

Les différences les plus importantes entre ORCHIDEE-STICS et ORCHIDEE sont:

- Pour le blé, les stocks de carbone sont plus faibles, les différences sont plus accusées (jusqu'à -30 %) sur les grandes plaines agricoles, où la part couverte par les PFT agricoles dans la maille est la plus grande. Cette diminution du stock de carbone est à relier à l'exportation d'une partie de la biomasse aérienne. Sur le SE de l'Espagne, de façon très localisée à l'est de l'Andalousie, une augmentation du stock de carbone est simulée ; mais le sol est très pauvre en carbone (15 t.ha<sup>-1</sup>) car les NPP annuelles sont très faibles (2 ou 3 t.ha<sup>-1</sup> contre 15 à 20 sur les autres régions). Avec OSblé, les réserves hydriques sont mieux conservées ; cela explique que la NPP soit plus importante, ainsi que le stock de carbone.
- Dans le cas du soja, la diminution du stock de carbone est encore plus accusée que pour le blé (56.9 t.ha<sup>-1</sup> au lieu de 68.4 t.ha<sup>-1</sup>) (figure 4.26) car la productivité annuelle est plus faible (tableau 4.11 et figure 4.23).

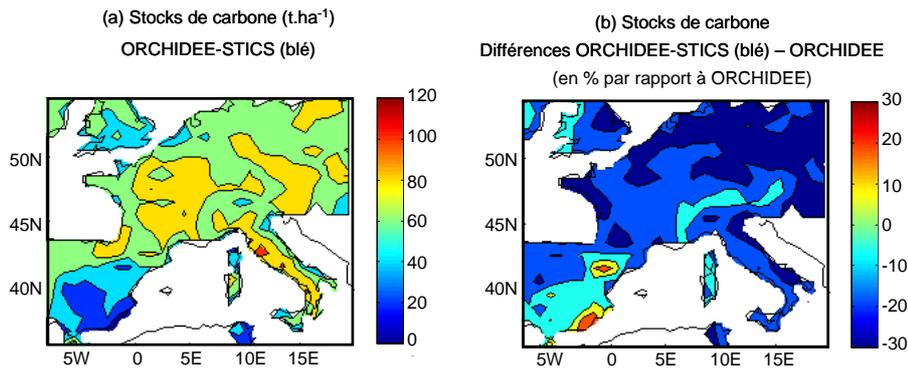


Figure 4.26 (a) Contenu en carbone du sol simulé par ORCHIDEE - STICS (blé) (unités t.ha<sup>-1</sup>) (a) ; différences ORCHIDEE – STICS (blé) – ORCHIDEE standard (en % par rapport à ORCHIDEE standard) (b).

		Stocks de carbone du sol (t.ha <sup>-1</sup> )
Simulations (moyenne sur les pixels situés en France et où la fraction agricole dépasse 50%)	OSblé	68.4
	OSsoja	56.9
	Ostd	90.0
Données (Arrouays et al., 2002)	Cultures	45.0
	Vignes et vergers	32.0

Tableau 4.11 : Comparaison des stocks de carbone du sol simulés par ORCHIDEE - STICS (OSblé et OSsoja) et par ORCHIDEE (Ostd) avec des données d'Arrouays et al. (2002).

#### Stock de carbone du sol (tC.ha<sup>-1</sup>)

20 - 30	
30 - 40	
40 - 50	
50 - 60	
60 - 70	
70 - 80	
80 - 90	
90 - 100	

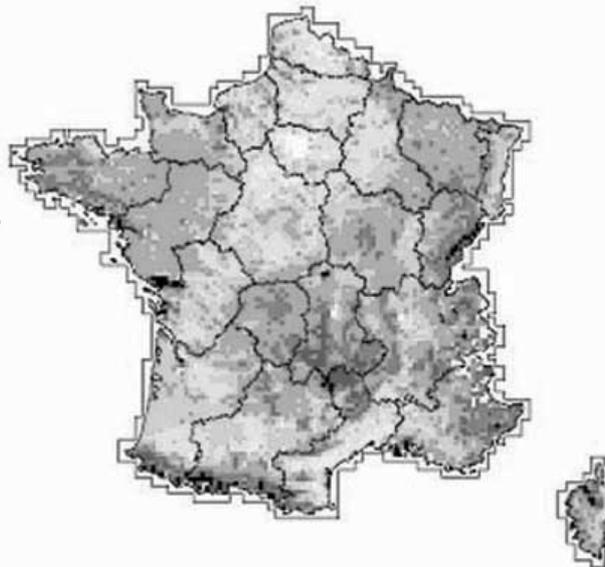


Figure 4.27 : Stocks de carbone pour les 30 premiers centimètres du sol (en tC.ha<sup>-1</sup>) sur la France d'après Arrouays et al. (2002).

#### 4.4.5 Synthèse

Sur la figure 4.28 sont résumés les résultats des comparaisons que nous avons effectuées sur les trois bilans : énergie, eau et carbone. Les flèches indiquent une différence entre ORCHIDEE-STICS et ORCHIDEE-standard, en moyenne sur l'Europe.

- Sur le bilan d'énergie, il y a des similitudes entre le blé et le soja. Comparés à une prairie naturelle quasi-permanente, les variations sur les flux sont peu sensibles pendant la période de végétation (printemps pour le blé, été pour le soja). Par contre les changements sont marqués durant la période où les parcelles sont nues. En conséquence, sur l'année, le flux de chaleur latente diminue et le flux de chaleur sensible augmente. La baisse du flux de chaleur latente est plus importante en valeur absolue que l'augmentation du flux de chaleur latente. L'énergie disponible en surface est plus faible (diminution du rayonnement net, hausse de l'albédo de surface).
- Sur le bilan hydrique, nous dissociérons le cas du blé de celui du soja :
  - La culture du blé consomme plus d'eau (cycle plus long, indices foliaires plus élevés) que celle du soja, mais sa croissance et son développement se situent au printemps : les précipitations sont abondantes et les réserves hydriques sont sollicitées de façon modérée. Pendant la saison estivale, le sol est nu, l'ETR diminue, contribuant à une meilleure protection des réserves hydriques.
  - Le cycle saisonnier du soja est centré sur l'été où moment où le bilan entre les précipitations et l'évapotranspiration est négatif sur la majorité des régions ; les réserves hydriques du sol sont donc plus sollicitées. Au printemps, le sol est nu alors que les réserves hydriques sont pleines, une partie de l'eau est donc perdue par ruissellement ou écoulement.
- Pour le bilan de carbone, les résultats dépendent du type de culture :
  - Le blé produit autant de biomasse annuelle que la prairie naturelle, mais une fraction importante de la biomasse est récoltée et ne migre pas vers les réservoirs de carbone du sol, les stocks de carbone du sol sont plus faibles.
  - Le soja produit donc moins de biomasse que le blé. La valeur absolue de biomasse délivrée au compartiment sol est donc plus faible.

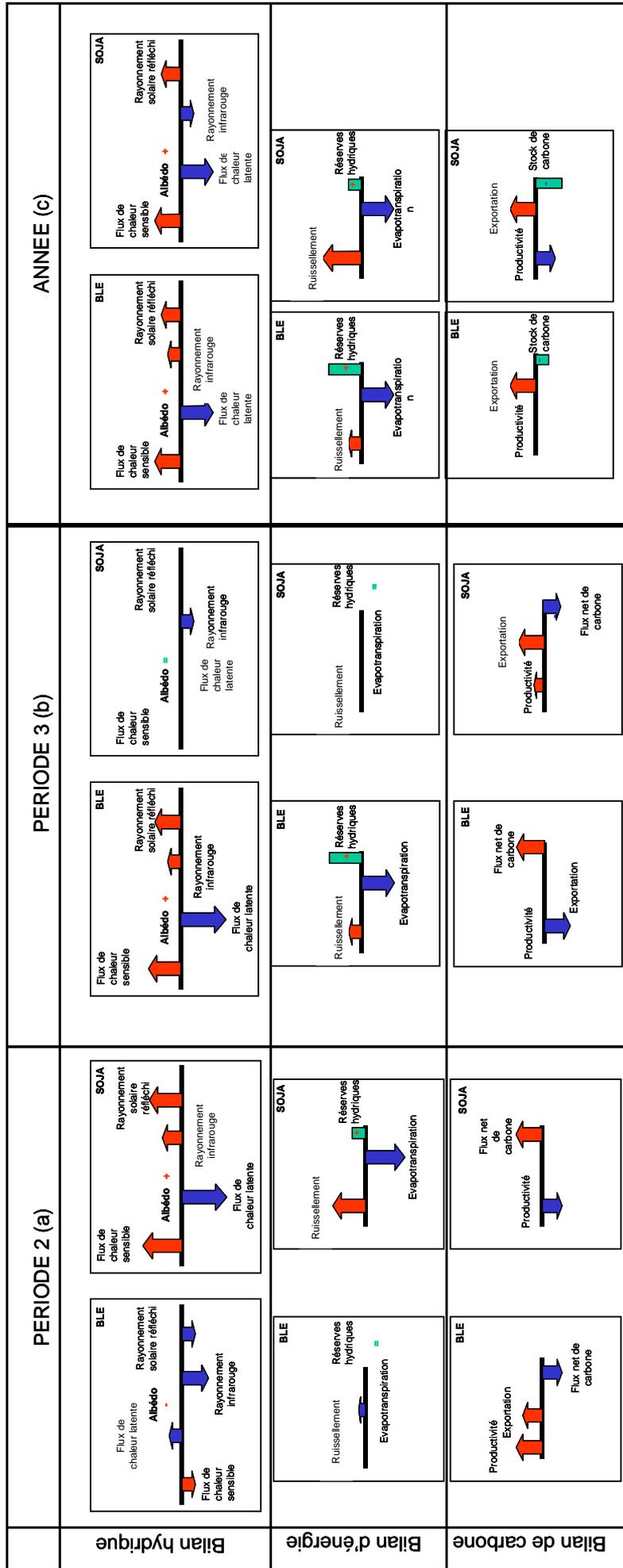


Figure 4.28 : Différences sur les bilans d'énergie, hydrique et de carbone entre ORCHIDEE-STICS et ORCHIDEE-standard (les flèches rouges indiquent des différences positives) : (a) pour la période de développement du blé ; (b) pour la période de développement du soja ; (c) en bilan annuel.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons analysé les résultats d'une simulation d'ORCHIDEE-STICS sur l'Europe. Ces résultats ont été validés avec des données de rendements agricoles de chaque pays et des champs de télédétection pour le cycle saisonnier. Les changements les plus importants de saisonnalité entre les cultures et les prairies, et notamment le raccourcissement général de leur cycle ont pu être quantifiés. Nous n'avons pas intégré à la fois des cultures d'hiver et de printemps en  $C_3$  dans une même maille, et l'ajout dans le modèle d'un nouveau PFT représentatif des cultures de printemps en  $C_3$  apparaît nécessaire. Les rendements simulés sont dans l'ensemble réalistes même si un certain nombre de limitations sont liées à nos hypothèses de départ simplifiées (même variété de blé, de maïs et de soja du nord au sud de l'Europe, même date de semis pour le blé et le soja, même profondeur de sol, optimisation des fertilisants et des irrigations, non prise en compte d'accidents physiologiques comme l'échaudage). La réalisation d'expériences de sensibilité comparées avec les données permettra de définir le niveau de raffinement à apporter aux variables et aux paramètres d'entrées.

Nous avons ensuite étudié l'impact des cultures sur le bilan hydrique, le bilan d'énergie et le bilan de carbone à l'échelle de l'Europe. Pour cela, nous avons comparé une simulation avec la version d'origine d'ORCHIDEE représentative des prairies naturelles et deux simulations avec ORCHIDEE-STICS, où les cultures sont respectivement du blé d'hiver et du soja. Trois résultats importants émergent de cette comparaison :

- Le cycle saisonnier des flux échangés entre la surface et l'atmosphère est beaucoup plus accentué dans le cas des cultures (qu'elles soient de printemps ou d'hiver).
- La phase du cycle saisonnier de l'ETR est déterminante pour les réserves hydriques. Le développement des cultures d'hiver a lieu au printemps quand les précipitations sont généralement abondantes et la demande climatique modérée : les réserves hydriques ne sont utilisées qu'en fin de cycle. Par contre, le développement des cultures de printemps a lieu quand la demande climatique est maximale, les réserves hydriques du sol sont plus sollicitées, nécessitant souvent un recours à l'irrigation.
- En ce qui concerne le rôle des cultures sur le cycle du carbone, l'exportation de la majeure partie de la biomasse aérienne lors de la récolte, contribue à diminuer les stocks de carbone du sol, de même que le labour. L'allongement de la durée du cycle végétatif ainsi que l'augmentation de la quantité de biomasse aérienne qui favorisent le stockage du carbone. Les cultures d'hiver en raison de leur cycle plus long, 7 ou 8 mois contre 3 à 5 mois pour les cultures de printemps, favorisent la NPP et donc le stockage du carbone. Le développement actuel de cultures dites intermédiaires est dans ce sens favorable au stockage du carbone dans le sol.

Cette comparaison montre l'utilisation de notre modèle comme outil d'aide à la décision qui pourra être complété à l'avenir avec d'autres espèces. À la lecture de ces résultats, on constate que l'utilisation de cultures d'hiver permet à la fois un meilleur maintien des réserves hydriques et des stocks de carbone du sol plus élevés. C'est cependant la tendance inverse qu'on observe à l'heure actuelle, avec la diversification des types de cultures face à la concurrence et aux problèmes de surproduction agricole. En effet, les cultures d'hiver occupaient 82 % de la superficie cultivée de la France en 1975, contre 61 % aujourd'hui (source SCEES).

## Chapitre 5.

# Évaluation de l'évolution de la productivité agricole et des stocks de carbone et d'eau au cours du XX<sup>ème</sup> siècle

---

Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, l'amélioration des pratiques culturales (sélection génétique des plants, ajouts de fertilisants, développement de l'irrigation) a permis de multiplier par 3 ou 4 (suivant les régions) les rendements agricoles. Les facteurs externes à l'agriculture, comme l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, et le réchauffement du climat influent aussi sur la productivité des cultures. Dans ce chapitre, nous tenterons de déterminer l'impact de chacun des trois groupes de facteurs (climat, CO<sub>2</sub>, pratiques agricoles) sur les cultures et leur environnement (productivité, stock de carbone du sol, réserves hydriques).

### 5.1 Contexte et objectifs de l'étude

Plusieurs études expérimentales ont été réalisées pour quantifier l'évolution de la productivité des cultures dans une atmosphère enrichie en CO<sub>2</sub>. Les résultats montrent une augmentation de 33% de la productivité brute (sur l'ensemble des cultures) pour un doublement de la concentration en CO<sub>2</sub> (Saugier, 1996). La productivité des légumineuses, (comme le soja) augmente encore plus (jusqu'à 40%) et à l'inverse, celles des plantes en C<sub>4</sub> (maïs) n'augmente que de 10 %. Pour l'ensemble des plantes en C<sub>3</sub>, l'élévation de la concentration en CO<sub>2</sub> tend à diminuer la résistance stomatique, ce qui réduit la transpiration de 10 à 20 %. La fraction d'allocation des produits de la photosynthèse vers les parties aériennes de la plante diminue ; si la photosynthèse est stimulée de 33 %, la biomasse aérienne n'augmente que de 10 %. L'objectif des premières expériences de modélisation est d'évaluer l'impact du changement climatique prévu pour le XXI<sup>ème</sup> siècle par les modèles de circulation générale de l'atmosphère sur les productions agricoles. Anticiper certains des changements permettrait de trouver des solutions en temps utile et de réduire les impacts négatifs. Les études numériques qui ont été entreprises sous forme de scénarios sur le siècle futur, s'orientent selon trois grands axes :

1) **Quantifier l'impact du changement climatique sur la productivité des cultures.** Ces études ont été réalisées avec des modèles agronomiques forcés par des scénarios de changement climatique fournis par les modèles de circulation générale. L'échelle considérée va de l'échelle locale à régionale. Les résultats montrent que l'effet du changement climatique a plusieurs conséquences potentielles sur le fonctionnement des plantes cultivées :

- L'effet fertilisant du **CO<sub>2</sub>** sur la photosynthèse des plantes en C<sub>3</sub>, permet d'améliorer les rendements. Le CO<sub>2</sub> augmente la résistance stomatique, ce qui réduit les pertes d'eau par transpiration, et rend les cultures plus résistantes à la sécheresse (Bazzaz et Sombroek, 1995).
- Pour ce qui est l'impact du **changement climatique**, l'effet de l'élévation de la température sur les rendements dépend de l'espèce et de la région étudiée. Juin (2001) montre que le réchauffement prévu permet l'extension en altitude de la culture du maïs et de certaines plantes fourragères dans les zones de moyenne montagne (exemple du Briançonnais). Sur les céréales, le réchauffement crée des conditions de photosynthèse plus proches des températures optimales, mais aussi un

raccourcissement du cycle végétatif qui réduit la durée de remplissage des grains (Abrol et Ingram, 1995). Domergue (2001) montre, sur les trente dernières années, un débourrement de plus en plus précoce des arbres fruitiers de la vallée du Rhône, ce qui les rend beaucoup plus vulnérables aux gelées de printemps. Le changement du régime des précipitations est plus difficile à prévoir (IPCC, 2001). Les ressources en eau pour l'agriculture sur les zones déjà soumises aux sécheresses (Sahel, Éthiopie, Moyen-Orient...) risquent de diminuer. L'élévation de la température favorise l'ETR et donc la diminution des réserves hydriques du sol (Evans, 1995).

- Delécolle *et al.* (2000) ont simulé l'évolution des rendements du blé et du maïs sur les sites agricoles d'Avignon, de Grignon et de Toulouse en réponse aux variations du climat et du CO<sub>2</sub> sur le siècle futur. Le réchauffement est favorable aux rendements du blé qui devraient augmenter de 2.5 à 7.5 % (maximum si l'on satisfait les besoins en irrigation) pour l'année 2030 avec 460 ppm. de CO<sub>2</sub>. Le constat sur le maïs sans irrigation est plus mitigé (+10 % à Versailles, -16 % à Avignon). En revanche, dans tous les cas, l'efficacité d'utilisation de l'eau augmente. Pour les États-Unis, Abler *et al.* (2000) montrent un impact positif sur les rendements de blé (~+5 %) en cas de réchauffement associé à une élévation du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sur les plaines proches de côte est des États-Unis (états de New York et de Caroline du Nord principalement). A l'échelle globale, Reilly *et al.* (1996) évaluent les conséquences du changement climatique sur les rendements du blé, du maïs et du soja pour les grandes parties du Monde. En Europe, les rendements du maïs augmenteraient de 5 à 10 %, à condition qu'il soit irrigué, et son implantation géographique devrait s'étendre vers le Nord. Cependant, les quantités annuelles nécessaires d'irrigation seraient plus importantes (+ 5 à 10 % selon les régions). Pour le blé, une augmentation générale des rendements est également probable grâce à l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, qui serait contrecarrée en partie par l'extension de la répartition géographique de certains parasites du blé.

## 2) Quantifier l'impact du changement climatique sur les flux de carbone :

- Actuellement, la biosphère se comporte comme un puits de carbone (entre 1 et 3 Pg.an<sup>-1</sup>) situé principalement dans l'hémisphère Nord selon Tans *et al.* (1990) et Bousquet *et al.* (2000).
- La biosphère de l'hémisphère Nord continuerait d'être un puits de carbone pour l'atmosphère, sur le XXI<sup>ème</sup> siècle, comme le montrent les simulations de Cox *et al.*, (2000). L'augmentation du CO<sub>2</sub> et la hausse des températures favorisent la photosynthèse, et le stockage de carbone dans le sol, même si le réchauffement accélère aussi la respiration du sol et donc le départ du carbone du sol.

## 3) Quantifier l'impact du changement d'utilisation des terres sur le cycle du carbone.

- Pour le XXI<sup>ème</sup> siècle, Gitz et Ciais (2003) ont évalué la participation des changements d'occupation des sols dans l'augmentation du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sur le siècle futur. Ils ont mis en évidence que les changements d'utilisation des terres à l'échelle globale (la déforestation en particulier) provoqueraient une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> d'environ 100 ppm, du fait du déstockage du carbone du sol et de la diminution du temps de résidence du carbone dans les écosystèmes cultivés, d'ici à 2100. Les incertitudes restent cependant importantes. Si l'on prend en compte l'effet du réchauffement associé à l'élévation de la concentration de CO<sub>2</sub>, qui stimule la respiration du sol, l'élévation obtenue est d'environ 120 ppm d'ici 2100.
- House *et al.* (2002) comparent plusieurs scénarios de changements d'utilisation des terres sur le siècle futur. La reforestation d'une partie des terres abandonnées par

l'agriculture permettrait de réduire la concentration de 40 à 70 ppm de CO<sub>2</sub> en 2100, comparativement à un scénario-témoin où la végétation n'évolue pas. À l'opposé, une déforestation complète et globale libèrerait l'équivalent de 130 à 290 ppm.

L'objectif de ce chapitre est d'estimer les variations, à l'échelle de l'Europe, au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, du bilan hydrique (évapotranspiration et réserve hydrique du sol) et du bilan de carbone (NPP, rendements, carbone du sol) pour les zones agricoles, sous l'effet des variations de trois facteurs environnementaux :

- **La concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère**
- **Le climat**
- **Les pratiques agricoles**

**Les superficies occupées** par les cultures au cours du siècle ont régressé dans la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> en parallèle à l'amélioration de la productivité (IFEN, 2002). En France, la superficies des terres arables est passée de 14.30 millions d'hectares dans les années 50 à 9.23 millions aujourd'hui. Ce quatrième facteur est laissé de côté pour notre étude, et nous faisons l'hypothèse arbitraire que les surfaces occupées par l'agriculture sont restées constantes entre 1900 et aujourd'hui.

## 5.2 Présentation des données de forçage

### 5.2.1 Pour les deux simulations de contrôle

Ces simulations permettent de mettre à l'équilibre les stocks de carbone du sol. L'état final d'équilibre représente l'état initial des trois simulations-scénarios transitoires (figure 5.1 et tableau 5.1). L'état initial des simulations d'équilibre est celui d'ORCHIDEE par défaut : le stock de carbone du sol est nul et les réserves hydriques sont maximales. Les données de forçage utilisées pour ces deux simulations sont les suivantes :

- La concentration en CO<sub>2</sub> est fixée à la valeur de 1900 (soit 297 ppm).
- Les données climatiques proviennent des stations météorologiques européennes et ont été ensuite interpolées pour obtenir un tableau à mailles régulières à la résolution spatiale de 10'. Ces données correspondent à l'année 1900, elles nous sont disponibles par le projet européen ATEAM et sont identiques dans les deux simulations.
- La carte de végétation pour les deux simulations est celle de la période actuelle (chapitre 4). Les cultures retenues sont le blé d'hiver et le maïs grain, négligeant le soja.
- Les pratiques agricoles diffèrent entre les deux simulations de contrôle:
  - Les dates de semis des deux simulations sont identiques à la simulation OSblé du chapitre 4. Pour le blé, elle est prescrite au 27 octobre et pour le maïs, elle a lieu quand la température hebdomadaire de l'air dépasse 10°C.
  - Pour os1900, les quantités de fertilisants d'os1900 sont calculées par STICS avec les mêmes paramètres qu'au chapitre 4. La quantité d'irrigation annuelle moyenne est de 148 kgN.ha<sup>-1</sup> pour le blé et de 128 kgN.ha<sup>-1</sup> pour le maïs. Cette différence s'explique par le fait que le blé a des besoins en azote plus élevés que le maïs. Pour os1900it, afin de se rapprocher des conditions du début du siècle, les fertilisants prescrits sont organiques, à raison de 2 t.ha<sup>-1</sup> de fumier (soit 32 kgN.ha<sup>-1</sup>) réparti au moment du semis sur chacune des mailles (N. Brisson, communication personnelle).
  - Pour os1900, les quantités d'irrigation ne sont calculées que pour le maïs, le blé n'est pas irrigué comme au chapitre 4. Il n'y a aucune irrigation dans os1900it.

- Les variétés de blé et de maïs utilisés au début du siècle avaient un cycle plus court (Mazoyer, 2002). Ces anciennes variétés n'existant plus à l'heure actuelle, celles dont les caractéristiques physiologiques sont les proches (cycle végétatif le plus court possible) parmi les variétés disponibles sont Récital (pour le blé) et Furio (pour le maïs). Leurs caractéristiques et leurs besoins thermiques sont présentés et sont comparés à ceux des variétés actuelles (section 5.2). Les sélections génétiques successives ont permis d'améliorer la part d'assimilats allouée aux grains. Ainsi, pour reconstituer au mieux les conditions du début du siècle, la fraction maximale de la NPP journalière allouée aux grains a été réduite à 0.35 (au lieu de 0.55) (J.F. Sousanna, communication personnelle). Les paramètres propres aux deux variétés qui interviennent dans le calcul du LAI (somme de températures nécessaires entre chacun des stades notamment) sont comparés sur le tableau 5.3).

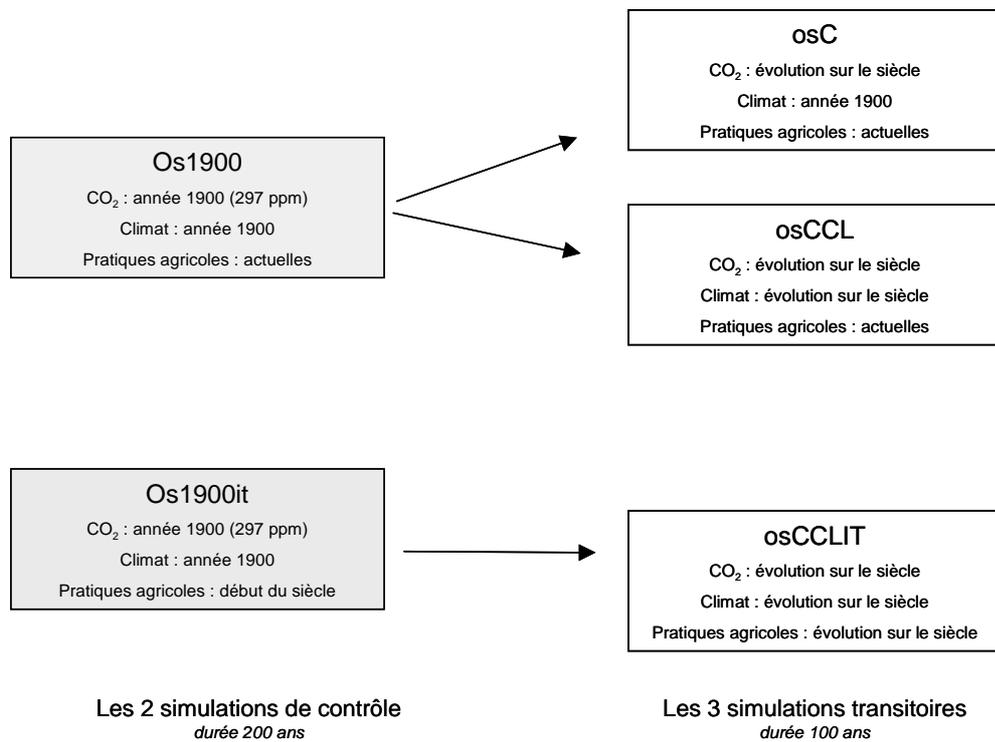


Figure 5.1 : Organisation des cinq simulations réalisées.

Nom de la simulation	État initial	Durée de la simulation	CO <sub>2</sub>	Climat	Itinéraire technique
Os1900	Par défaut	200 ans	297 ppm	1900	Actuel
Os1900it	Par défaut	200 ans	297 ppm	1900	1900
OsC	État final os1900 (*)	100 ans 1901-2000	Évolution sur le siècle	1900	Actuel
OsCCL	État final os1900 (*)	100 ans 1901-2000	Évolution sur le siècle	1901-2000	Actuel
OsCCLIT	État final os1900it	100 ans 1901-2000	Évolution sur le siècle	1901-2000	Variable

(\*) Je m'engage pour la soutenance à refaire toutes ces simulations à partir d'un même état initial (os1900it).

Tableau 5.1 : Caractéristiques des cinq simulations réalisées.

### 5.2.2 Pour les trois simulations transitoires sur le siècle

Les trois simulations transitoires réalisées sur le XX<sup>ème</sup> siècle ont les caractéristiques suivantes :

- Pour osC, la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère suit l'évolution observée au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, elle a augmenté de 297 à 370 ppm. Les données nous ont été fournies via le projet européen ATEAM. Les données climatiques sont identiques pour toutes les années et sont celles de l'année de référence 1900. Les pratiques agricoles sont actuelles.
- Pour osCCL, la concentration CO<sub>2</sub> et les conditions climatiques suivent l'évolution observée sur le siècle, les pratiques agricoles sont actuelles. La température annuelle a augmenté d'environ 0.8°C (figure 5.2). L'évolution des températures montre trois périodes :
  - 1) 1900-1945 : élévation de 0.4°C
  - 2) 1946-1975 : diminution de 0.3°C
  - 3) 1975-2000 : élévation de 0.7°C

Il n'y a pas d'évolution aussi nette des précipitations même si elles semblent en moyenne plus faibles pendant les périodes les plus chaudes du siècle (entre 1940 et 1950 et à partir de 1980). Si l'on considère uniquement les périodes de développement du blé et du maïs, les tendances mises en évidence pour l'année complète se vérifient, les précipitations estivales tendant toutefois à diminuer sur les trente dernières années.

- Pour osCCLIT, les trois facteurs environnementaux varient. L'état initial d'équilibre, différent des deux premières simulations, provient de l'état final de la simulation os1900it. L'évolution des pratiques agricoles, décrite sur la figure 5.3 est la suivante :
  - 1) Les pratiques du début du siècle sont prescrites sur la période 1900-1950 :
  - 2) 1951-2000 : en 1951, les fertilisants organiques sont remplacés par des fertilisants minéraux. De 1951 à 2000, les doses de fertilisants appliquées sont calculées par STICS. Le seuil sur le stress azoté à partir duquel STICS déclenche les fertilisants a été relevé de manière linéaire entre 0.60 en 1951 (correspondant à une fertilisation moyenne de 35 kgN.an<sup>-1</sup>, avec la climatologie de l'année 1951) et 0.85 en 1980 (correspondant à une fertilisation moyenne de 165 kgN.an<sup>-1</sup>, avec la climatologie de l'année 1980) ;

- 3) 1981-2000 : en 1981, les variétés à cycle long actuelles (Soissons pour le blé, EKV pour le maïs) (chapitre 4) remplacent les anciennes variétés. La date de semis du blé est avancée au 1<sup>er</sup> octobre.

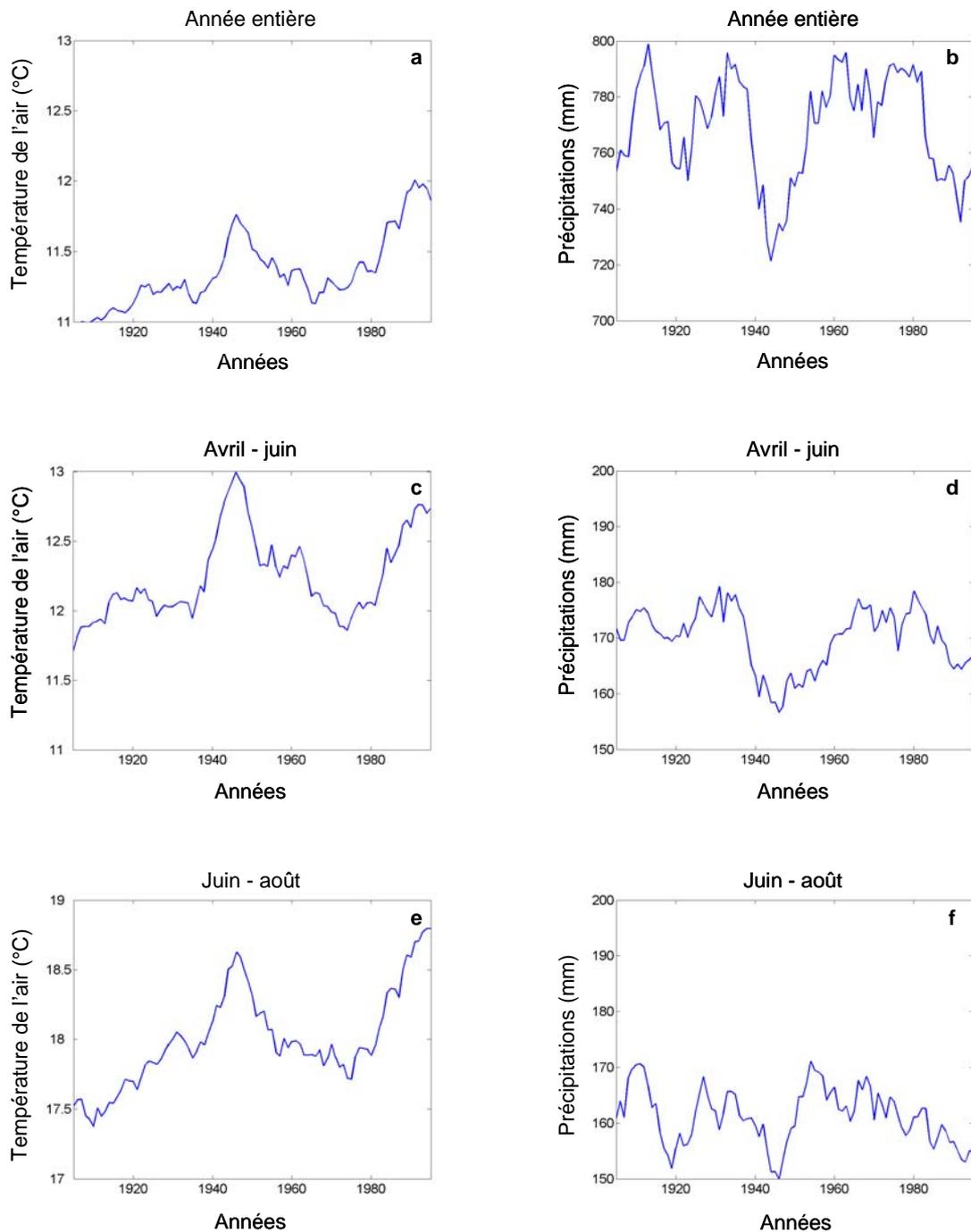


Figure 5.2 : Évolution des températures sur le XX<sup>ème</sup> siècle (moyennes mobiles sur 5 ans sur l'Europe) ; (a) année entière ; (c) mois d'avril à juin (croissance du blé) ; (e) mois de juin à août (croissance du maïs). Evolution des précipitations sur le XX<sup>ème</sup> siècle (moyennes mobiles sur 5 ans sur l'Europe) ; (b) année entière ; (d) mois d'avril à juin ; (f) mois de juin à août.

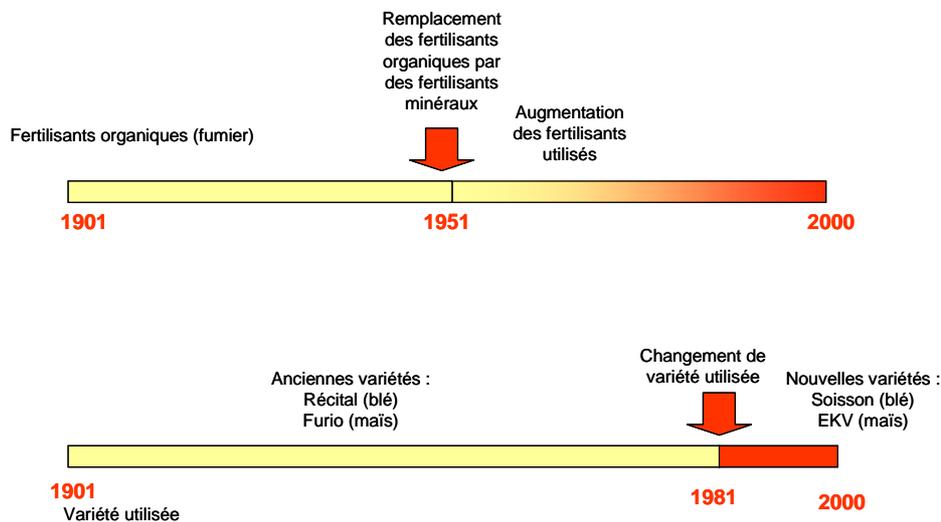


Figure 5.3 : Évolution des pratiques agricoles sur le siècle, prescrites pour la simulation osCCLIT.

## 5.3 Comparaison des deux simulations de contrôle

### 5.3.1 Comparaison des productions primaires nettes du blé et du maïs

En comparant les deux simulations de contrôle, on note que les NPP annuelles simulées par os1900 sont élevées (moyenne de  $9.8 \text{ tC.ha}^{-1}$ ) (figure 5.4a) et les hétérogénéités spatiales peu accentuées (écart-type égal à  $0.94 \text{ tC.ha}^{-1}$ ). Celles simulées par os1900it (figure 5.4b) sont inférieures de 32% (en moyenne sur l'Europe) et aussi plus hétérogènes spatialement (écart-type =  $1.56 \text{ tC.ha}^{-1}$ ). Les productivités simulées par os1900it sont plus faibles d'environ 20 % en Allemagne, au sud de l'Espagne ou encore en Italie, qu'en France. Dans le cas de l'année particulière 1900, la zone optimale pour la variété Récital est plus restreinte, cette variété semble moins adaptée aux conditions froides en hiver (comme en Allemagne) ou sèches au printemps (en Europe du Sud) que Soissons.

Pour expliquer ces différences spatiales, on a comparé les cycles du LAI du blé entre un point de grille situé dans le bassin parisien (point A,  $3^{\circ}\text{E}$ ,  $48^{\circ}\text{N}$ ) (symbolisant la zone où la variété Récital est la plus productive) et un autre situé dans le Brandebourg (E de l'Allemagne) (point B,  $14^{\circ}\text{E}$ ,  $52^{\circ}\text{N}$ ) (où cette variété est peu productive) (figure 5.5).

- La variété Récital a un cycle plus court que celui de la variété Soisson d'une quinzaine de jours environ (tableau 5.2) car les seuils de GDD prescrits diffèrent pour les deux variétés. Cette différence représente en partie l'amélioration génétique des plants qui en allongeant la durée des cycles des cultures a permis d'augmenter le remplissage des grains et les rendements.
- Le LAI simulé par os1900it est plus faible sur les deux points de grille que celui d'os1900, car beaucoup moins de fertilisants y ont été prescrits, ce qui concorde avec les faibles productivités simulées. Pour os1900it, les faibles doses de fertilisants ne couvrent pas de manière optimale les besoins de la culture. En A, les stress azotés moyens sur le cycle végétatif, valent respectivement 0.76 (os1900it) et 0.94 (os1900). Comparé à os1900, l'intégrale du LAI sur le cycle saisonnier d'os1900it est plus faible de 50% en A et 66% en B. Afin d'expliquer les différences de productivité simulées entre A et B lorsque les pratiques agricoles du début du siècle sont prescrites, chaque phase du cycle du LAI est détaillée.

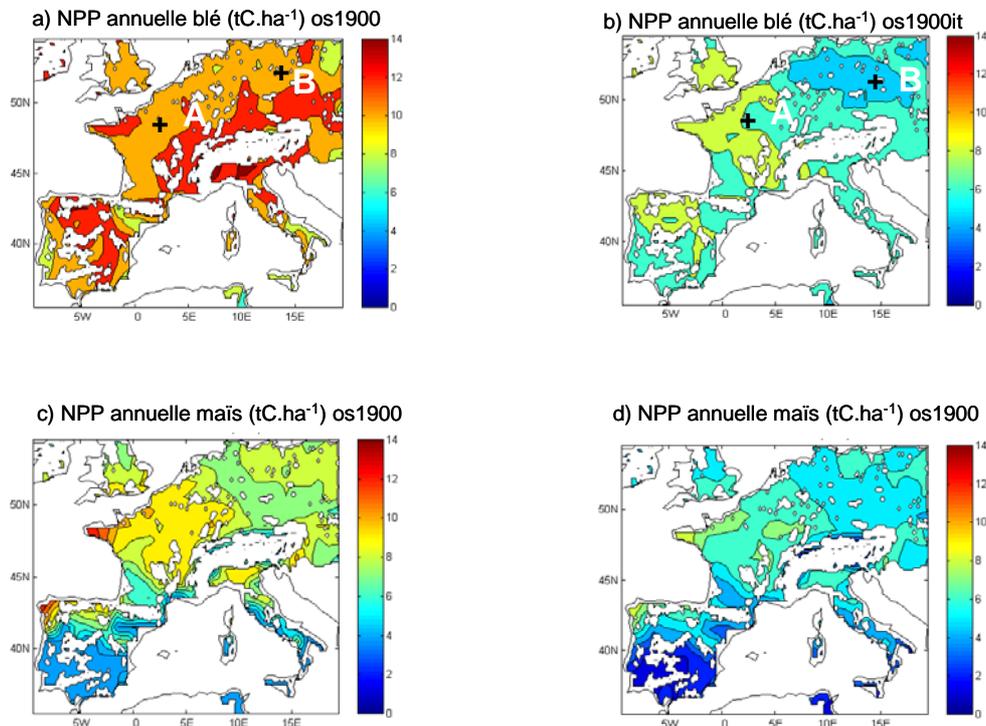


Figure 5.4 : NPP annuelles (en  $tC \cdot ha^{-1}$ ) simulées dans les conditions climatiques et de concentration en  $CO_2$  de 1900 : (a) pour le blé avec les pratiques agricoles actuelles; (b) pour le blé avec les pratiques agricoles de 1900 ; (c) pour le maïs avec les pratiques agricoles actuelles ; (d) pour le maïs avec les pratiques agricoles de 1900. Les croix matérialisent les deux points de grille choisis pour la figure 5.5.

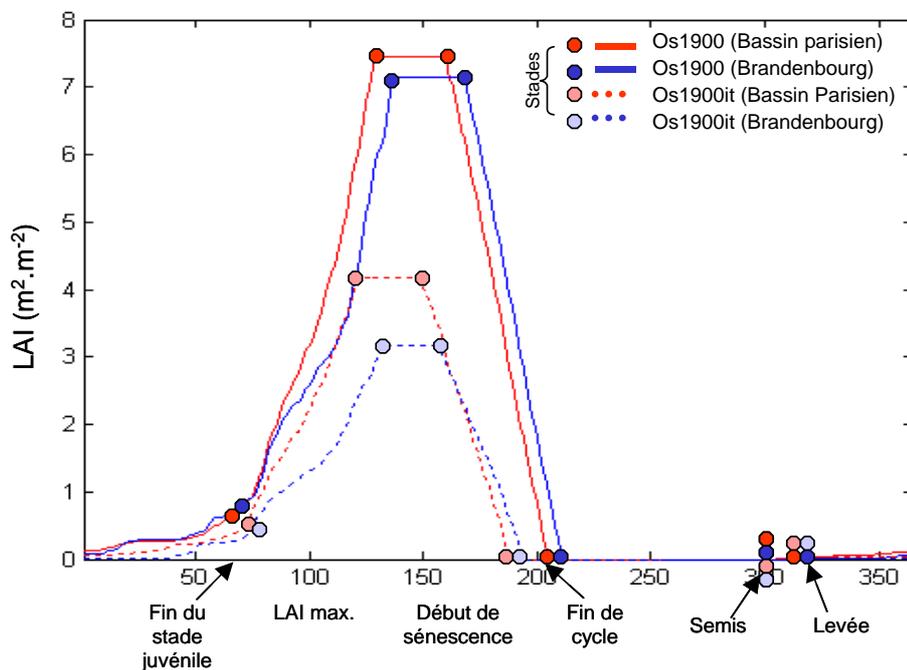


Figure 5.5 : LAI simulés pour le blé pour le point de grille A (bassin parisien, en rouge) ( $3^{\circ}E$ ,  $48^{\circ}N$ ) et pour le point de grille B (Brandenburg, en bleu) ( $13^{\circ}E$ ,  $53^{\circ}N$ ) avec os1900 (trait continu) et os1900it (trait pointillé).

Les différences les plus importantes concernent la durée de la montaison, séparant les stades intermédiaires de croissance et LAI maximum. C'est la période de croissance très rapide du LAI, qui dure 6 jours dans la simulation os1900it aussi bien en A qu'en B (tableau

5.3). L'allongement de la montaison permet d'atteindre des LAI plus élevés. La vitesse de croissance du LAI pendant la phase de montaison diffère sur les deux points considérés. En A, la croissance reste soutenue à un niveau élevé sur toute la période, alors qu'en B, on distingue deux phases :

- Période 1 (jours 85 à 110) : la croissance est du LAI ralentie car les températures sont plus basses dans le Brandebourg de 5 ou 6 °C (figure 5.6). La pente de la courbe (c'est-à-dire la vitesse de croissance du LAI) est plus faible en B. L'écart entre les pentes des points A et B (tableau 5.3) est plus important pour os1900it (presque un rapport de 1 à 3) que pour os1900 (rapport 1 à 2).
- Période 2 (jours 110 à 130) : la croissance du LAI s'accélère en B et les vitesses de croissance sont voisines en A et en B car l'écart des températures s'amenuise. Par contre il y a des différences marquées entre os1900 et os1900it au point B. Pour os1900, entre A et B, la vitesse de croissance du LAI et sa valeur maximale sont semblables, même s'il y a un déphasage d'une dizaine de jours sur le stade LAX. Pour os1900it, entre A et B, il y a aussi un déphasage d'une dizaine de jours et surtout la vitesse de croissance en A est plus élevée qu'en B. En conséquence, la valeur maximale du LAI est plus basse en B. Cette différence est liée au stress azoté qui est plus accentué en B qu'en A (tableau 5.4). Comment se fait-il que le stress azoté soit plus fort en B qu'en A alors que les quantités initiales de fertilisants sont les mêmes ? Les températures étant plus basses en B qu'en A, la minéralisation de l'azote dans le sol est plus lente (réaction de nitrification par les micro-organismes du sol). Au contraire, dans os1900, suffisamment de fertilisants sont disponibles pour assurer les besoins de la plante.

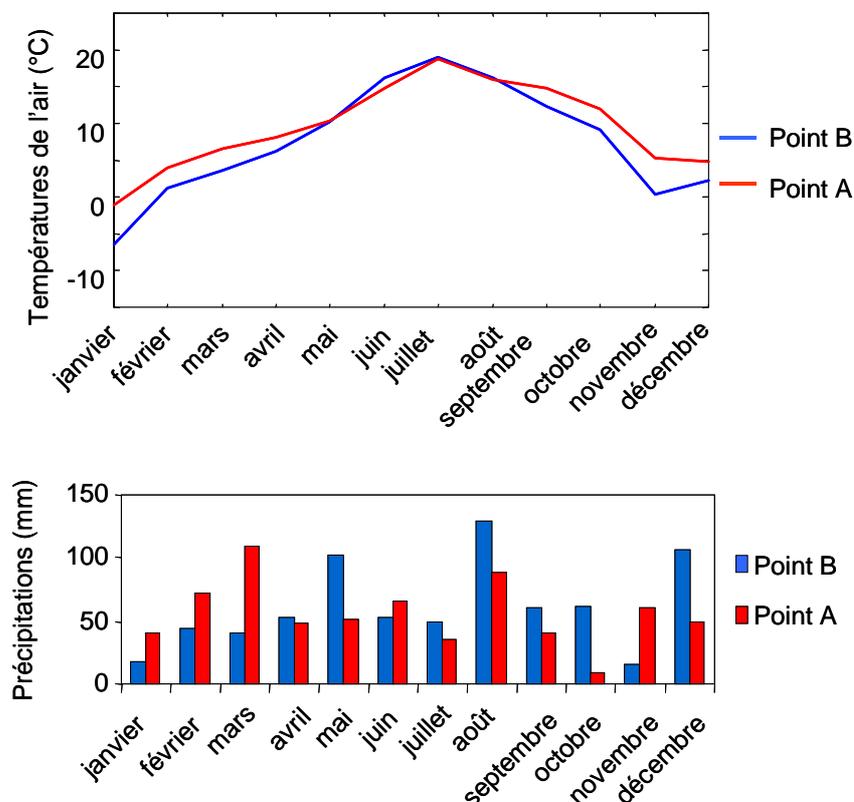


Figure 5.6 : Températures (°C) et précipitations (mm) mensuelles comparées sur les deux points de grille A (France) (en rouge) et B (Allemagne) (en bleu).

Phases STICS	Simulation os1900 (variété Soissons)			Simulation os1900it (variété Récital)		
	Sommes des températures	Durée (j) Point A	Durée (j) Point B	Somme des températures	Durée (j) Point A	Durée (j) Point B
Semis - Levée	51	6	10	51	6	10
Levée - Fin du stade juvénile	237	131	132	227	128	129
Fin du stade juvénile - LAI maximum	310	57	61	260	51	55
LAI maximum - Début de la sénescence	237	27	25	214	24	20
Début de la sénescence - Fin du cycle	693	41	41	683	39	41
TOTAL	1522	262	269	1435	248	255

Tableau 5.2 : Durées des différentes phases du cycle phénologique dans le cas du blé avec os1900 (variété Soisson) et os1900it (variété Récital).

	Pente os1900 A	Pente os1900 B	Pente os1900it A	Pente os1900it B
Période jours 85 à 115	94 10 <sup>-3</sup>	48 10 <sup>-3</sup>	73 10 <sup>-3</sup>	28 10 <sup>-3</sup>

Tableau 5.3 : Pentés comparées entre os1900 et os1900it sur la période critique comprise entre les jours 80 et 105 (unités m<sup>2</sup>.m<sup>2</sup>.j<sup>-1</sup>)

	A (os1900)	B (os1900)	A(os1900IT)	B(os1900IT)
Stress azoté	0.93	0.96	0.78	0.71
NPP annuelle (t.ha <sup>-1</sup> )	11.1	10.8	7.4	5.9
Intégrale annuelle du LAI (m <sup>2</sup> .m <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup> )	674,2	636,7	334,4	215,3

Tableau 5.4 : Stress azotés et NPP simulés pour le blé sur chacun des deux sites (A et B) avec les deux simulations d'équilibre (os1900 et os1900it).

Pour os1900it dans le cas du maïs, les disparités spatiales sont, comme pour le blé, plus fortes pour os1900it que pour os1900 (écart-type de 1.33 t.ha<sup>-1</sup> contre 1.18 t.ha<sup>-1</sup>). Cette hétérogénéité est moins marquée que pour blé. Dans os1900it, les faibles valeurs de NPP dans le sud de l'Europe (sud-est de l'Espagne, sud du Portugal, Italie) sont la conséquence d'un stress hydrique prolongé du fait de l'absence d'irrigation. Les NPP simulées dans la partie nord (nord de l'Angleterre, nord de l'Allemagne) sont faibles. La variété utilisée à cycle court semble avoir une « zone optimale » plus limitée dans l'espace, et est plus sensible aux conditions climatiques (sécheresse, froid). Dans os1900, le calcul par STICS des fertilisants et des irrigations optimales pour chaque maille tend à uniformiser spatialement les productivités annuelles pour le blé et pour le maïs.

### 5.3.2 Evaluation des rendements du début du siècle

On examine maintenant si les rendements simulés sont réalistes et en particulier si les disparités spatiales mises en évidence dans les conditions du début du siècle le sont. Pour cela, la biomasse des grains simulée par ORCHIDEE-STICS (chapitre 4) est comparée avec les statistiques de rendements par pays fournies par l'Institut International d'Agriculture (IIA, 1960) pour le début du siècle (figure 5.7). Si l'on considère la moyenne sur l'Europe (tableau 5.5) :

- La biomasse des grains simulée par ORCHIDEE-STICS (os1900 et os1900it) est généralement surestimée pour les différents pays. Comme pour la NPP, la biomasse des grains d'os1900it est plus faible.
- Les rendements simulés par STICS sont plus réalistes que ceux obtenus avec ORCHIDEE-STICS. La fraction maximum de biomasse allouée vers les grains a été abaissée; ce n'est pas le cas dans ORCHIDEE. Les fractions d'allocation simulées par ORCHIDEE, semblables dans les deux simulations, sont comprises entre 0.4 et 0.5 (figure 5.8) ; ces valeurs correspondent à celles des plantes cultivées actuelles, obtenues après sélection génétique. Les fractions d'allocation des plantes cultivées, nettement plus faibles, plus proches des plantes naturelles, étaient comprises entre 0.20 et 0.30 (N. Brisson, communication personnelle). La biomasse aérienne simulée par ORCHIDEE a été multipliée (*a posteriori*) par l'indice de récolte qui est le rapport entre la biomasse des grains et la biomasse aérienne calculée par STICS. Les résultats obtenus sont alors beaucoup plus proches des rendements observés, ce qui souligne l'importance du paramètre d'allocation.
- Toutefois, les rendements du blé calculés par STICS sont encore supérieurs aux données. Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer ces différences :
  - STICS est calibré sur des cultures actuelles, pour celles moins productives du début du siècle, il n'est donc pas étonnant de constater que le modèle donne des rendements trop élevés ;
  - Les accidents physiologiques comme la verse, étaient plus fréquents avec les espèces du début du siècle et ne sont pas simulés. La verse est la chute sur le sol des tiges à la suite d'un orage ou de pluies abondantes. Elle diminue le rendement et complique la coupe. Pour diminuer les risques de verse, les améliorations génétiques ont raccourci la hauteur de la tige ;
  - Les produits phytosanitaires n'étaient pas employés à cette époque. Les maladies ou les parasites, comme l'ergot, étaient plus nombreux et contribuaient à abaisser les rendements ;
  - La densité de semis était plus faible qu'à l'époque actuelle (90 pl.m<sup>-2</sup> au lieu de 130 pl.m<sup>-2</sup>) (Mazoyer, 2002).

	<b>Os1900</b>	<b>Os1900it</b>	<b>Os1900it*F</b>	<b>STICS</b>	<b>données</b>
Blé	6.81	3.76	2.26	2.44	1.55
Maïs	5.14	3.52	2.12	1.94	1.78

Tableau 5.5 : Rendements simulés et observés (en t.ha<sup>-1</sup> de matière sèche). Le détail des abréviations est donné dans le texte. F abaisse l'indice de récolte de 0.45 à 0.25.

Si l'on considère les rendements par pays (figure 5.7), les données ne montrent pas une hétérogénéité spatiale aussi accentuée que dans la simulation. Les rendements simulés pour la France (3.18) sont 30 % supérieurs à ceux de l'Allemagne (2.23) ; c'est l'inverse dans les données (1.32 et 2.14). Les mêmes pratiques agricoles sont prescrites pour tous les pays. Ce postulat permettrait d'établir que les pratiques agricoles étaient plus avancées en Allemagne qu'en France. Cette hypothèse semble confirmée par l'étude de Boulaïne (1996) qui montre que les engrais phosphatés étaient davantage utilisés en Allemagne qu'en France au début du siècle. Par ailleurs, dans les conditions environnementales du début du siècle, la variété Récital ne semble pas bien adaptée à l'Allemagne, et d'autres variétés plus adaptées y ont probablement été utilisées.

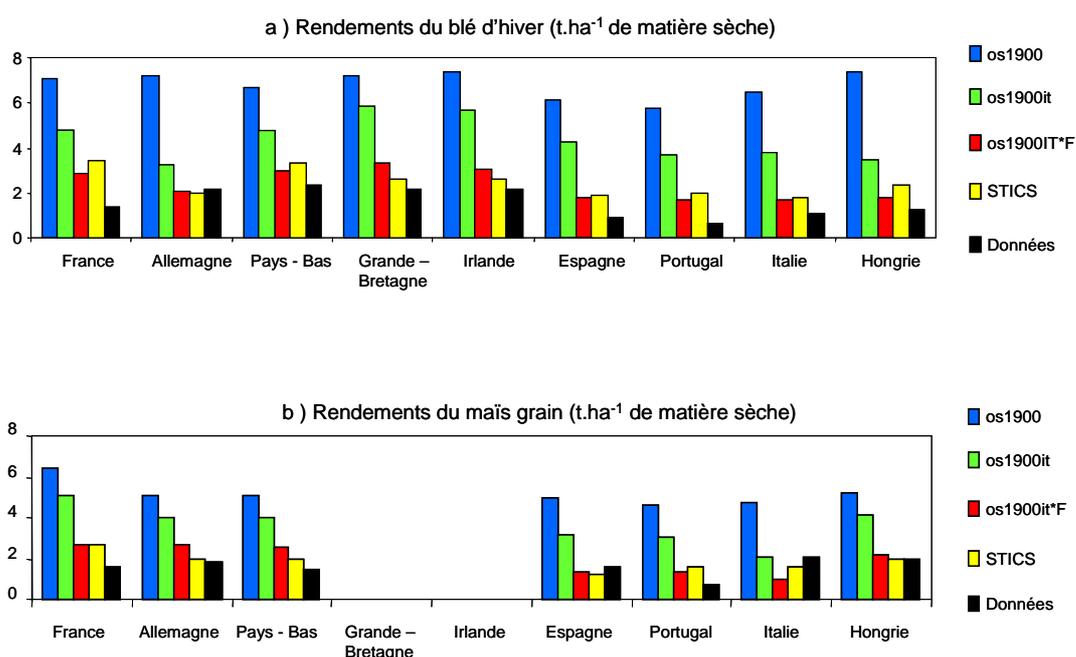


Figure 5.7 : Rendements simulés (en t.ha<sup>-1</sup>) par os1900 (en bleu), os1900it (en vert), os 1900it\*F (en rouge), STICS (en jaune), comparés avec les rendements d'Institut International d'Agriculture (en noir) : (a) pour le blé ; (b) pour le maïs.

Les rendements simulés sont également plus faibles dans l'Europe méditerranéenne qu'ailleurs et ce gradient nord-sud s'observe aussi dans les données. Les rendements de l'Espagne, du Portugal et de l'Italie sont nettement plus faibles que ceux des autres pays. Ces faibles rendements, déjà constatés lors de l'évaluation de ORCHIDEE - STICS pour la période actuelle (chapitre 4), s'expliquent par la combinaison d'un stress hydrique important et prolongé auxquels s'ajoutent des accidents physiologiques (échaudage). Ces accidents ne sont pas pris en compte dans notre modèle. Pour les conditions du début du siècle, nous n'avons pas pu obtenir des renseignements précis sur les variétés et les pratiques culturales dans les pays méditerranéens.

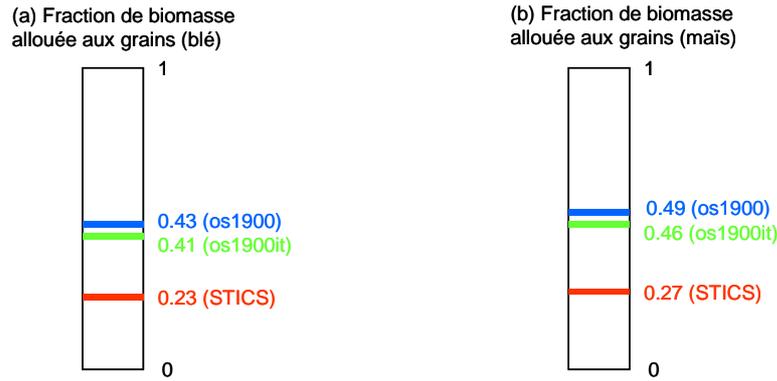


Figure 5.8 : Fractions d'assimilats moyennes allouées aux grains, comparées par os1900 (en bleu), os1900IT (en vert), STICS (en rouge) : (a) pour le blé ; (b) pour le maïs.

En résumé, la simulation os1900it\*F reproduit relativement bien le gradient nord-sud constaté dans les données de rendements, mais il reste une erreur systématique de surestimation des rendements, sauf sur les pays où les pratiques étaient déjà améliorées, comme par exemple en Allemagne et Royaume-Uni.

### 5.3.3 Comparaison des stocks de carbone du sol

En comparant les stocks de carbone du sol (figure 5.9), on note que les disparités spatiales reflètent celles déjà constatées pour la NPP du blé (puisqu'il est largement majoritaire en superficie), les écart-types valent  $6.84 \text{ t.ha}^{-1}$  et  $8.97 \text{ t.ha}^{-1}$  respectivement pour os1900 et os1900it. L'amélioration des techniques culturales, au sens large, a eu pour effet d'augmenter les stocks de carbone agricole mais aussi de lisser la variabilité spatiale.

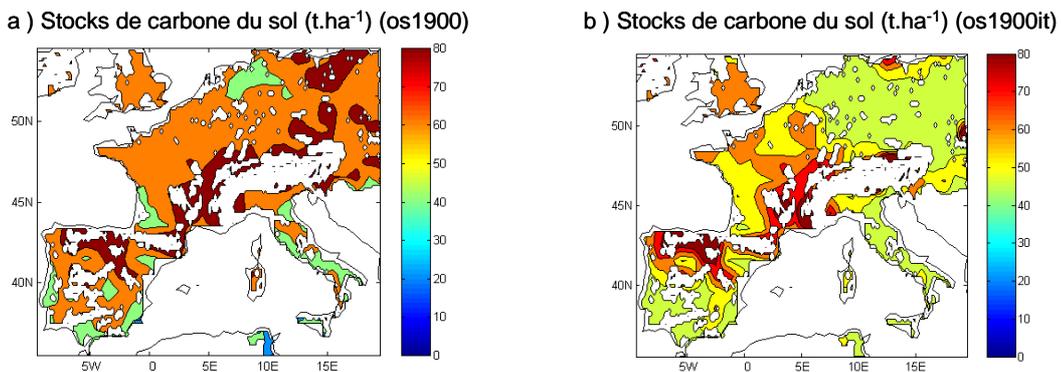


Figure 5.9 : Stocks de carbone du sol agricole (en  $\text{t.ha}^{-1}$ ) simulé avec os1900 (a), os1900it (b).

## 5.4 Rôle du $\text{CO}_2$ , du climat et des pratiques culturales sur l'évolution de l'état des cultures sur le XX<sup>ème</sup> siècle

Il s'agit maintenant d'évaluer la part respective des trois facteurs ( $\text{CO}_2$ , climat, pratiques agricoles) sur le cycle de l'eau (ETR, réserves hydriques) que celui du carbone (productivité, rendements, stocks de carbone du sol). On considéra en premier les rendements. Les statistiques de rendements sont les seules données continues sur le XX<sup>ème</sup>

siècle. On analysera ensuite les variations simulées sur les réserves hydriques et les stocks de carbone agricole. Sur le XX<sup>ème</sup> siècle, a-t-on observé un stockage plus important du carbone dans les sols ? Comment ont été affectées les réserves hydriques du sol ?

#### 5.4.1 Evolution comparée des rendements

On analyse l'évolution des rendements du blé et du maïs au cours du XX<sup>ème</sup> siècle pour chaque simulation. Nous allons tout d'abord comparer les états initiaux et finaux de chacune des trois simulations transitoires. Nous considérerons ensuite l'évolution des rendements simulés sur le siècle en choisissant deux pays la France et l'Espagne.

a) Le blé :

Cette comparaison permet de dégager les résultats suivants (figures 5.10 et 5.11 ; tableau 5.6) :

- En réponse à l'augmentation du CO<sub>2</sub>, (osC) les rendements du blé simulés augmentent de 10 à 12 %, de manière homogène spatialement. Pour la France, par exemple, ils passent de 6.67 à 7.36 t.ha<sup>-1</sup>.
- Si le CO<sub>2</sub> et le climat varient (scénario OsCCL), les rendements augmentent généralement, (5 à 6 % en moyenne sur l'Europe). On note toutefois une variabilité spatiale marquée : les rendements diminuent en Espagne et dans le sud de l'Italie, jusqu'à -20 %. Sur ces régions, les précipitations diminuent (-100 mm soit 30 %) sur les 50 dernières années et le réchauffement (+1.8°C au printemps) accroît l'ETR. En conséquence, les réserves hydriques diminuent sur ces régions. Si l'on considère la période 1940-2000 en Espagne, pendant laquelle les précipitations diminuent, on remarque que la baisse des rendements du blé n'est sensible qu'à partir de 1986, c'est-à-dire partir du moment où les précipitations sur la période d'avril à juin deviennent inférieures à 130 mm. Ailleurs en Europe, sur les zones où le stress hydrique reste faible au printemps ou au début de l'été, les rendements augmentent autant que pour le premier scénario (entre 10 % et 12 %). De plus, on note une variabilité interannuelle des rendements simulés lié au climat sur l'ensemble de l'Europe, comme par exemple, pour la France (écart-type = 0.73 t.ha<sup>-1</sup>). Elle est encore plus accusée en Espagne (écart-type = 1.23 t.ha<sup>-1</sup>).
- En intégrant l'effet des pratiques culturales, l'augmentation des rendements du blé est beaucoup plus marquée (par exemple de 3.89 t.ha<sup>-1</sup> à 7.10 t.ha<sup>-1</sup>, soit 82.5 %, pour la France). Cette augmentation est plus forte sur les régions où la NPP simulée par os1900it est la plus faible (cf. 5.2). Quelle que soit la région considérée, l'impact de l'amélioration des pratiques agricoles est prépondérant comparé à celui du CO<sub>2</sub> et du climat. Notons aussi qu'en Espagne, l'augmentation des rendements est moins importante qu'en France (en valeur absolue).
- Si nous ajoutons maintenant l'effet des sélections génétiques sur l'allocation vers les grains, l'augmentation des rendements simulée est encore plus marquée. En France, les rendements passent de 2.1 à 7.1 t.ha<sup>-1</sup>. Nous pouvons ainsi reproduire de manière réaliste l'évolution des rendements sur le XX<sup>ème</sup> siècle. Il est également important de noter que les sélections génétiques ont autant contribué à l'augmentation des rendements que l'amélioration des pratiques agricoles. En Espagne, l'état initial et l'état final sont en accord avec les données, mais on note un déphasage important entre 1960 et 1990, où les rendements simulés sont surestimés. Il est probable que le changement de pratiques agricoles et les sélections génétiques successives a eu lieu principalement pendant les années 1980. En

Espagne, c'est le changement des pratiques agricoles qui a le plus contribué à l'amélioration des rendements.

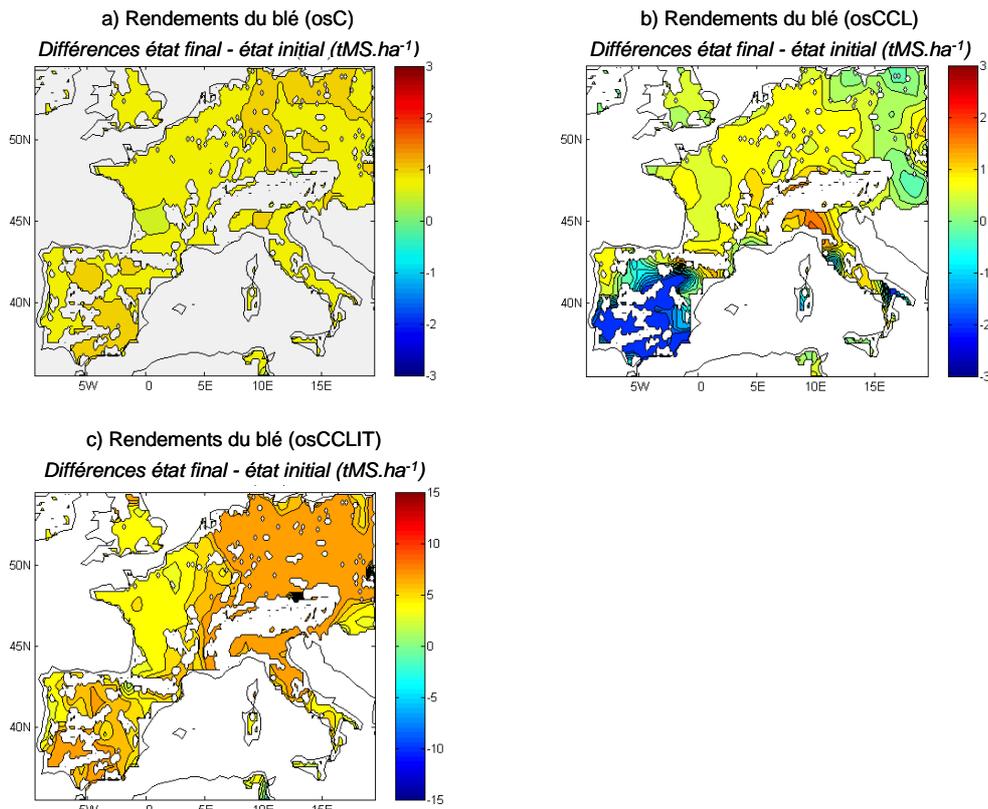


Figure 5.10 : Rendements du blé pour les trois simulations transitoires : différences état final - initial osC ( $\text{CO}_2$  seul) (a), osCCL (climat +  $\text{CO}_2$ ) (b) et osCCLIT ( $\text{CO}_2$  + climat + pratiques agricoles) (c).

## b) le maïs

Cette comparaison a été effectuée en parallèle pour le maïs (figures 5.12 et 5.13 ; tableau 5.6):

- L'augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère a un impact plus faible sur les rendements du maïs que pour le blé (+4 à 5 %). La photosynthèse des plantes en  $\text{C}_4$  (comme le maïs) est déjà efficace pour des concentrations en  $\text{CO}_2$  inférieures à 100 ppm, et évolue peu lorsque la concentration en  $\text{CO}_2$  augmente.
- L'effet du climat a pour conséquence comme pour le blé d'ajouter une variabilité interannuelle des rendements. En revanche, les rendements ne diminuent pas automatiquement sur l'Europe du sud, car le maïs est irrigué. La quantité de précipitations estivales ne diminue pas notablement. En raison de l'élévation de la température, la quantité annuelle irriguée nécessaire augmente de 10 % (soit de 225 mm à 255 mm en moyenne sur l'Europe).
- En intégrant en plus l'évolution des pratiques agricoles, les rendements augmentent de 52 % en moyenne sur l'Europe. Les disparités spatiales sont moins marquées que pour le blé (58% d'augmentation en France, 50% en Espagne).
- Si nous ajoutons en plus l'effet des sélections génétiques successives sur l'allocation des assimilats vers les grains, les rendements passent de  $1.80 \text{ t.ha}^{-1}$  à  $6.65 \text{ t.ha}^{-1}$  soit une augmentation de 105 %. Comme pour le blé, les sélections génétiques successives ont contribué de manière importante (environ un tiers) à l'amélioration des rendements du maïs aussi bien en Espagne qu'en France.

En résumé, la comparaison des trois simulations montre la prépondérance de l'évolution des pratiques agricoles et des caractéristiques des espèces sélectionnées vis-à-vis des autres facteurs pour le blé et le maïs. Il est important de noter que l'amélioration de l'indice de récolte par la sélection génétique ont autant contribué à l'amélioration des rendements que l'augmentation des fertilisations.

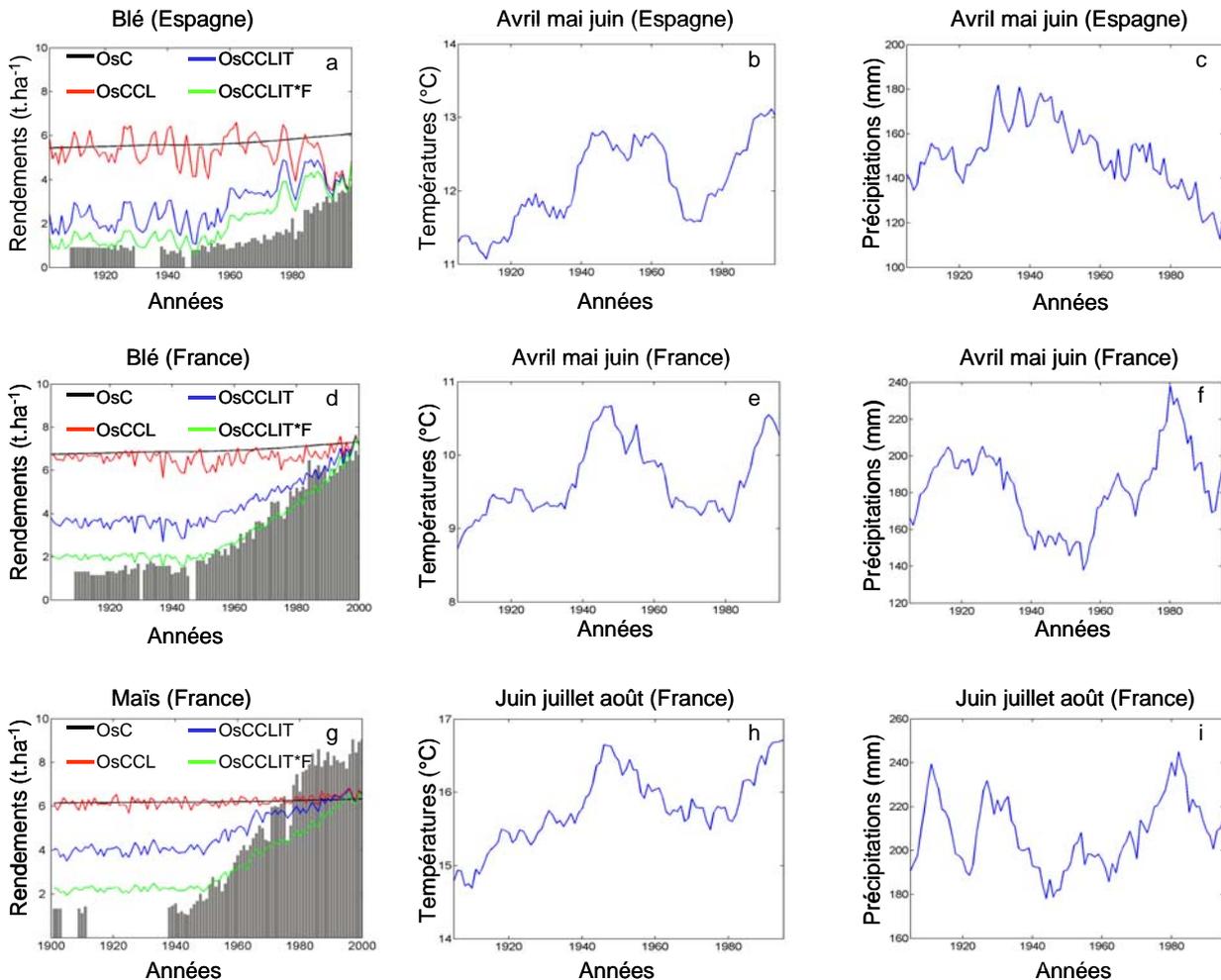


Figure 5.11 : Évolution comparée des rendements simulés et observés sur le siècle : a) sur l'Espagne pour le blé ; d) sur la France pour le blé ; g) sur la France pour le maïs. Légende des couleurs : Simulations : osC ( $CO_2$  seul) (en noir), osCCL ( $CO_2$  + climat) (courbe rouge), osCCLIT ( $CO_2$  + climat + pratiques agricoles) (courbe bleue), osCCLIT\*F (F est l'indice de récolte calculé par STICS, sa valeur maximale est fixée à 0.25 jusqu'en 1950 puis augmente linéairement jusqu'à 0.45 en 2000) (courbe verte) ; Données (source : Institut international d'agriculture de 1909 à 1947 ; FAO de 1948 à 2000) (bâtonnets gris). Evolution des températures sur le XX<sup>ème</sup> siècle : (b) pour avril - juin en Espagne ; (e) pour avril - juin en France ; (h) pour juin - août en France. Evolution des précipitations sur le XX<sup>ème</sup> siècle : (c) pour avril - juin en Espagne ; (f) pour avril - juin en France ; (i) pour juin - août en France.

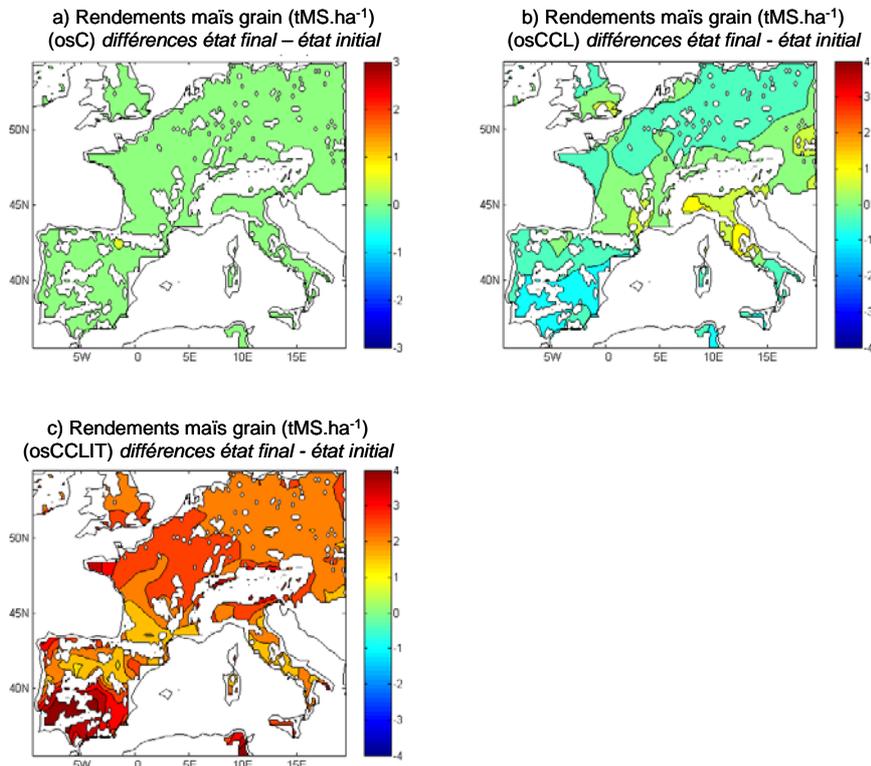


Figure 5.12 : Différences sur les rendements du maïs simulés pour les trois simulations (en t.ha<sup>-1</sup>) : moyenne 1996-2000) – (moyenne 1901-1905) état final - initial osC (CO<sub>2</sub> seul) (a), osCCL (climat + CO<sub>2</sub>) (b) et osCCLIT (CO<sub>2</sub> + climat + pratiques agricoles) (c).

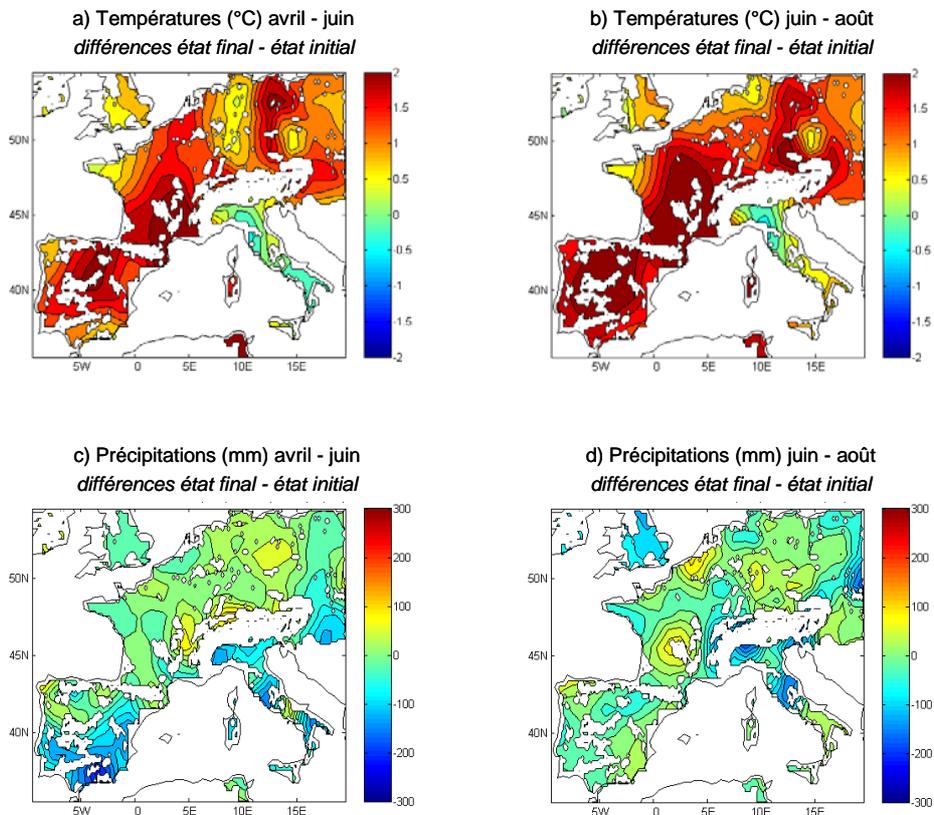


Figure 5.13 : Différences sur les températures de l'air (en °C) (moyenne 1996-2000 - moyenne 1901-1905) : (a) pour avril – juin ; (b) pour juin – août. Différences sur les précipitations (en mm) (moyenne 1996-2000 - moyenne 1901-1905) : (c) pour avril – juin ; (d) pour juin – août.

Pays	Simulation	Espèce	Rendements état initial 1901-1905	Rendements état final 1996-2000	Augmentation (%) (/. état initial)	Part dans l'augmentation totale (%) (/. osCCLIT*F)
France	OsC	Blé	6.67	7.36	10.3	13.9
		Maïs	6.10	6.33	3.8	5.5
	OsCCL	Blé	6.47	7.16	10.7	13.9
		Maïs	6.10	6.33	3.8	5.5
	OsCCLIT	Blé	3.89	7.10	82.5	64.7
		Maïs	3.98	6.30	58.3	55.0
	OsCCLIT*F	Blé	2.11	7.07	235.1	100
		Maïs	2.06	6.28	204.9	100
	Données	Blé	1.28	6.91	139.8	
		Maïs	1.41	7.97	165.2	
Espagne	OsC	Blé	5.41	6.06	12.0	21.1
		Maïs	4.26	4.49	5.4	8.8
	OsCCL	Blé	5.21	4.16	-20.2	-34.1
		Maïs	4.20	4.10	-2.4	-3.8
	OsCCLIT	Blé	1.98	4.16	110.1	70.8
		Maïs	2.53	4.09	61.7	60.0
	OsCCLIT*F	Blé	1.08	4.16	285.2	100
		Maïs	1.48	4.08	175.7	100
	Données	Blé	0.98	3.88	295.7	
		Maïs	0.86	8.91	936.0	

Tableau 5.6 : Évolution des rendements sur le XX<sup>ème</sup> siècle pour le blé et le maïs simulé par les scénarios (osC : CO<sub>2</sub> seul), osCCL (CO<sub>2</sub> + climat), osCCLIT (CO<sub>2</sub> + climat + pratiques agricoles), osCCLIT\*F (CO<sub>2</sub> + climat + pratiques agricoles + sélection génétique).

#### 5.4.2 Evolution des stocks de carbone

On étudie maintenant l'effet des trois facteurs (CO<sub>2</sub>, climat et pratiques agricoles) sur les stocks de carbone du sol. Si la NPP augmente, une quantité de biomasse plus importante (en valeur absolue) rejoint le sol par l'intermédiaire de la litière. Le stock de carbone du sol augmente-t-il de manière analogue à la biomasse ? Comme précédemment, les résultats sont présentés en comparant d'abord les états finaux et initiaux, puis l'évolution des stocks de carbone sur le XX<sup>ème</sup> siècle est comparée (figures 5.14 et 5.15):

Sous l'effet du CO<sub>2</sub> seul, l'augmentation relative simulée (+ 2 à 3 %) est plus faible que celle simulée pour la biomasse du blé (5-6 % environ) car une fraction de la NPP est respirée. Le stock de carbone augmente de manière relativement uniforme spatialement, comme pour la biomasse.

- Si on ajoute l'effet du climat, le contenu du carbone du sol reste quasi-stable, avec une légère diminution entre 1945 et 1960. Deux effets se compensent : l'augmentation de la température favorise la dégradation de la matière organique par les microorganismes du sol, mais l'élévation du CO<sub>2</sub> atmosphérique augmente la NPP indirectement le stockage de carbone dans le sol. Le contenu en carbone reste quasi-stable avec une compensation entre la hausse de la température de l'air et celle de la concentration en CO<sub>2</sub>. Il y a des différences spatiales marquées. Ces variations reflètent celles constatées pour la biomasse : diminution sur l'Espagne en particulier. Les valeurs simulées pour l'état final sont partout plus basses

qu'avec osC (CO<sub>2</sub> seul), en effet l'augmentation de la température favorise la décomposition de carbone.

- Si nous considérons l'effet additionnel des pratiques agricoles (osCCLIT), on distingue deux grandes périodes. La période 1900-1950, où les stocks de carbone sont à peu près stables. Les pratiques agricoles du début du siècle sont prescrites, il n'y pas d'augmentation de la biomasse, ni des stocks de carbone. La période 1951-2000, où nous avons augmenté les doses de fertilisants prescrites et modifié les variétés. Les productivités ont augmenté de manière importante (+39 %) et les stocks de carbone s'accroissent de 61 t.ha<sup>-1</sup> à 72 t.ha<sup>-1</sup> (soit une variation de 15 %). On note des différences spatiales, qui sont plus importantes sur les zones où la NPP du blé a le plus augmenté.

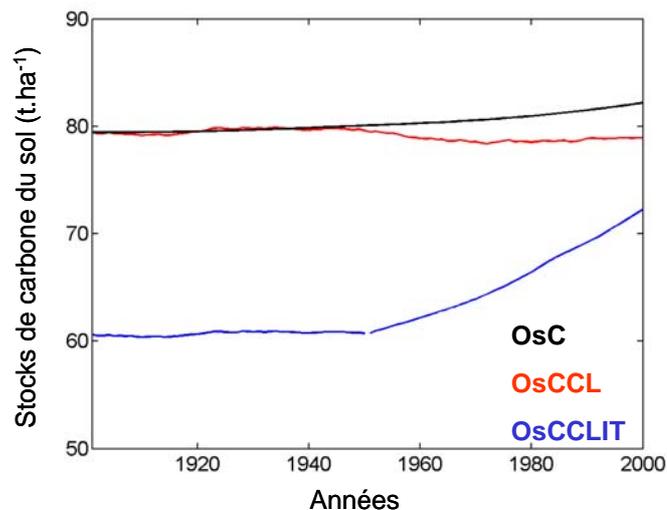


Figure 5.14 : Évolution comparée du stock de carbone du sol (partie agricole uniquement) : os (CO<sub>2</sub> seul) (en noir), osCCL (CO<sub>2</sub> + climat) (en rouge), et osCCLIT (CO<sub>2</sub> + climat + pratiques agricoles) (en bleu).

Nous avons fait l'hypothèse forte que la trajectoire est indépendante de l'état initial. Le stock de carbone atteint en 2000 reste inférieur à la valeur de la simulation osCCL : l'équilibre n'est pas atteint, le carbone du sol met un certain nombre d'années à s'équilibrer avec une productivité annuelle stable.

Il est très important de relativiser ces chiffres car nous n'avons pas pris en compte l'effet du labour qui est parallèle à celui de meilleures pratiques agricoles. Johnson (1972) montre que les labours au cours du siècle sont devenus plus profonds. Dans le cas d'une culture de blé située sur la station agronomique de Rothamsted au Royaume-Uni, le déstockage observé du carbone du sol est d'environ 10 % sur la période 1930-1970, en relation avec des labours plus profonds. Cependant, depuis une petite dizaine d'années, on tend à recommander aux agriculteurs de diminuer cette profondeur de labour (J. Lévêque, communication personnelle). D'autre part, les fertilisants organiques (comme le fumier) ont été progressivement remplacés par des engrais minéraux (azoté et phosphorés) durant les années 50. Les fertilisants organiques contribuaient à ajouter du carbone dans le sol. En prenant l'hypothèse que 2 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de fumier était répandu sur l'ensemble des terres arables de l'Europe de l'Ouest, ceci permet d'augmenter les stocks de carbone du sol d'environ 5C t.ha<sup>-1</sup> soit 8% (à l'équilibre).

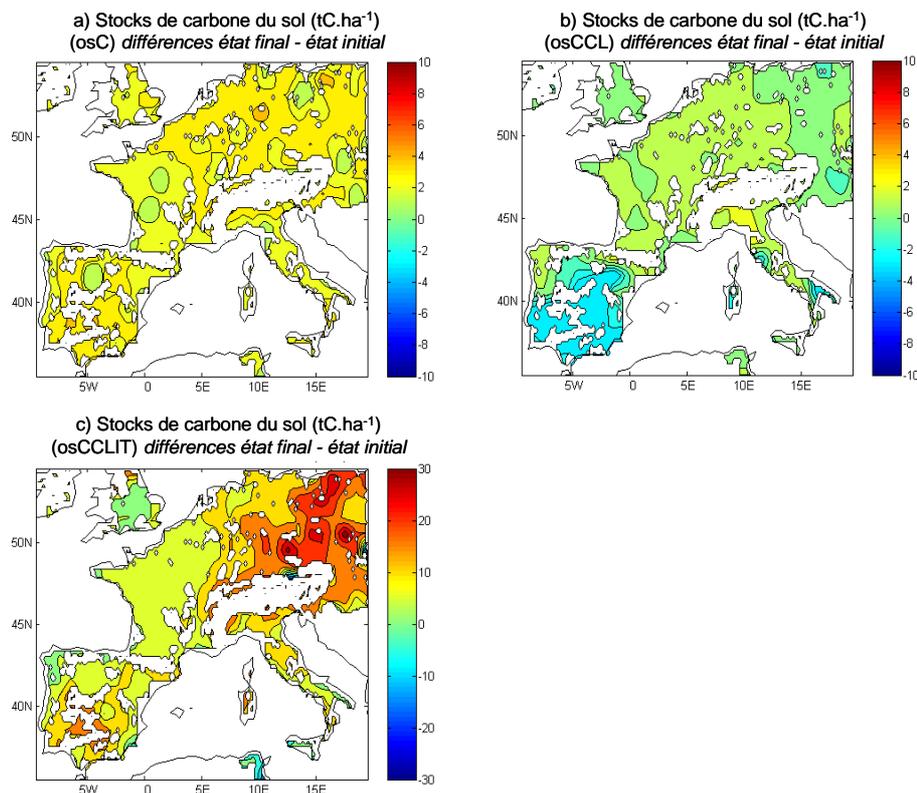


Figure 5.15 : Différences état final - état initial sur les stocks de carbone du sol ( $tC.ha^{-1}$ ) : (a) osC ; (b) chaque simulation transitoire osC (a), osCCL (b), osCCLIT (c).

En résumé, nous avons montré le rôle prédominant du changement des pratiques agricoles : Les pratiques agricoles (hors labour) et l'accroissement du CO<sub>2</sub> augmentent la productivité et le stockage de carbone du sol. Au contraire, le réchauffement sur le XX<sup>ème</sup> siècle a peu d'effet sur la NPP des cultures (en moyenne) et tend à diminuer légèrement le stockage du carbone (tableau 5.7).

Simulations		osC	osCCL	OsCCLIT
NPP	Blé	8.9 %	8.6 %	55.6 %
	Maïs	2.6 %	3.2 %	61.9 %
Stocks de carbone du sol		3.1 %	-0.9 %	30.6 %

Tableau 5.7 Variations relatives des NPP et des stocks de carbone pour les trois simulations.

### 5.4.3 Evolution du bilan hydrique (réserve en eau du sol, évapotranspiration)

Nous analysons ensuite l'impact de chacun des trois facteurs (CO<sub>2</sub>, climat et pratiques agricoles) sur l'ETR (figure 5.16) et les réserves hydriques (figure 5.17) :

- Si le CO<sub>2</sub> évolue seul, l'ETR annuelle est peu affectée car deux effets sont en compétition : d'une part le CO<sub>2</sub> favorise la photosynthèse et donc la transpiration ; d'autre part, le CO<sub>2</sub> augmente la résistance stomatique de la plante, ce qui limite la transpiration. L'effet de la résistance stomatique semble l'emporter après 1960 car l'ETR commence à diminuer, ce qui coïncide avec cette période où le CO<sub>2</sub> augmente le plus vite.
- En additionnant l'effet du climat à celui du CO<sub>2</sub> (osCCL), on note que l'évolution du climat ajoute une variabilité interannuelle. Le réchauffement favorise la demande climatique

qui augmente l'ETR et peut accentuer l'effet du stress, en particulier sur les zones avec des précipitations faibles.

- Avec les trois facteurs évoluent simultanément sur le siècle :
  - l'ETR reste globalement stable pendant la première moitié du siècle (pratiques agricoles du début du siècle) ;
  - sur la seconde moitié du siècle, avec l'amélioration des pratiques agricoles, l'ETR augmente de 10 %. Nous avons déjà évoqué l'amélioration des pratiques culturale et ses effets sur le cycle saisonnier (indices foliaires plus élevés et cycles saisonniers plus longs), qui favorise la photosynthèse et la transpiration. Les variations simulées sur les évapotranspirations cumulées sont environ trois fois plus faibles que celles simulées pour les biomasses (~30 %). Nous avons déjà remarqué au chapitre 4 que la transpiration est moins sensible que la productivité à une variation de l'indice foliaire, en particulier si ceux-ci sont déjà moyens ou élevés (à partir de 3.5 - 4).

Pour les réserves hydriques, nous présentons le mois de septembre car c'est la période la plus critique : le blé a été récolté, les réserves en eau sont au plus bas après la sécheresse estivale et juste avant les premières pluies d'automne, comme nous l'avons mis en évidence au chapitre 4. Un changement environnemental verra donc ses conséquences accentuées :

- Nous venons de mettre en évidence que la hausse du CO<sub>2</sub> contribuait à faire baisser très légèrement l'évapotranspiration : l'évolution sur le siècle des réserves en eau montre une augmentation très faible et non significative du contenu en eau du sol (en intégrale sur la région considérée). Cet état relativement stationnaire se retrouve sur l'ensemble de notre terrain d'étude (on peut faire le parallèle avec la hausse des rendements assez uniforme sur la figure 5.10a).
- Si nous prenons en compte l'effet du climat et celui du CO<sub>2</sub>, les différences spatiales sont beaucoup plus importantes (jusqu'à 90 mm) sur les zones les plus sèches, comme le sud de l'Espagne et le sud de l'Italie. Les précipitations de printemps et d'été diminuent sur ces régions (-15 à 20 %) et provoquent une diminution importante des réserves hydriques. Le stress hydrique est aggravé pendant la période printanière et estivale. Les rendements diminuent dans ces régions (cf. figure 5.10b). Sur les autres régions, nous avons un état stable des réserves ou une faible diminution.
- Ajoutons maintenant l'effet des pratiques agricoles : la diminution des réserves hydriques est presque généralisée à notre région d'étude. L'amélioration des pratiques agricoles a conduit à augmenter l'ETR (d'environ 10 %) et diminuer le contenu en eau du sol. Cet écart est plus conséquent sur les régions où les productivités sont plus faibles dans les conditions du début du siècle dans notre simulation (Allemagne, Espagne...).

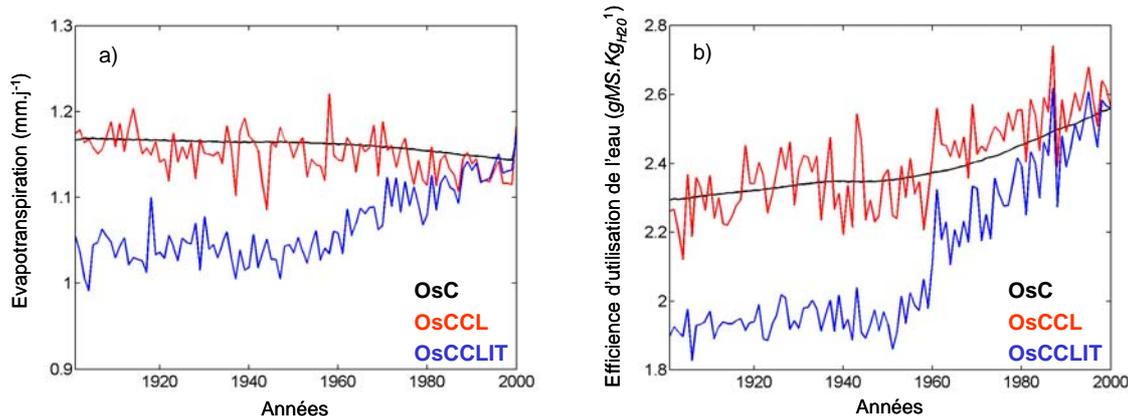


Figure 5.16 : (a) Évolution sur le XX<sup>ème</sup> siècle de l'évapotranspiration (en  $\text{mm.j}^{-1}$ ) (moyenne annuelle sur l'Europe) ; (b) évolution de l'efficacité d'utilisation de l'eau en ( $\text{gMS.KgH}_2\text{O}^{-1}$ ). Légende des simulations : osC (en noir), osCCL (en rouge) et osCCLIT (en bleu).

L'efficacité de l'utilisation de l'eau est définie comme le rapport entre la NPP de la plante et l'ETR annuelle. Elle est améliorée sur le XX<sup>e</sup> siècle : la NPP augmente de près de 40 % alors que l'ETR n'augmente que de 10 %.

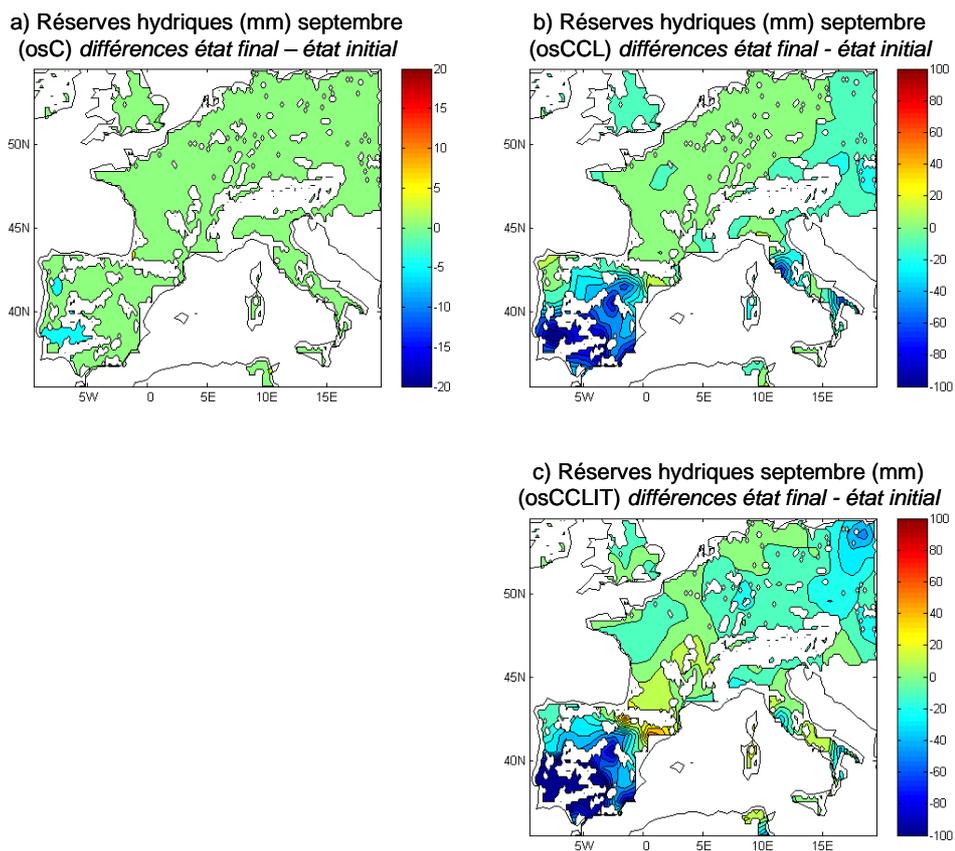


Figure 5.17 : Réserves hydriques du sol en septembre (en mm) : différences état final - état initial pour osC (a), osCCL (b) et osCCLIT (c).

## 5.5 Synthèse des résultats sur le XX<sup>ème</sup> siècle

### 1. Les rendements du blé et du maïs

Nos premiers résultats sont encourageants car nous avons pu reproduire en grande partie l'évolution des rendements sur le siècle pour un pays comme la France, avec des hypothèses de départ simplifiées. La prise en compte de la diminution de l'allocation vers les grains en cas de stress azoté important permet d'améliorer les rendements simulés dans les conditions environnementales du début du siècle. Mais, la répartition spatiale sur l'Europe des productivités dans les conditions du début du siècle reste à améliorer, en particulier par l'acquisition de données de pratiques agricoles plus précises (variétés, fertilisations...) pour chaque pays.

### 2. Le stock de carbone

Nous avons montré le rôle de puits des zones agricoles, l'augmentation de la productivité a permis le stockage de  $8 \text{ tC.ha}^{-1}$  soit  $0.410 \text{ TgC}$ , sur l'Europe de l'Ouest ; ce chiffre correspond aux émissions de  $\text{CO}_2$  de la France pendant six mois. Les simulations présentées dans notre étude sont des simulations transitoires où le puits de carbone est lié principalement à l'augmentation de la productivité sur les cinquante dernières années. Actuellement la productivité du blé n'augmente quasiment plus en Europe de l'Ouest (à l'exception de l'Espagne, de l'Italie et du Portugal) donc le stockage du carbone risque donc de diminuer dans les années à venir. D'autre part, nous n'avons pas considéré le labour qui entraîne une perte de carbone de près de 30% (Smith et al., 2000a). Dans le modèle, les tiges ne sont pas exportées au moment de la récolte ; dans la réalité elles sont en grande partie exportées et utilisées dans l'année (nourriture pour le bétail par exemple). En considérant uniquement le changement d'occupation des sols, Janssens *et al.* (2003) montrent que les cultures sont une source de carbone car une partie d'entre elles étaient auparavant une prairie ou une forêt. Une autre partie d'entre elles

### 3. Les réserves hydriques

Sur le dernier siècle, l'évolution du climat et des pratiques culturales a contribué à diminuer les réserves hydriques du sol, mais de manière inégale suivant les régions. Les différences les plus importantes affectent les zones déjà sensibles, c'est-à-dire les plus sèches.

## 5.6 Perspectives

### 5.6.1 L'impact du changement d'utilisation des sols

L'effet du changement d'utilisation des terres sur le XX<sup>ème</sup> siècle n'a pas été traité. Nous avons présenté, au début de ce chapitre, quelques études bibliographiques montrant la part importante de la déforestation dans l'augmentation des gaz à effet de serre. À l'échelle de l'Europe occidentale, cependant, les surfaces agricoles ont été défrichées depuis le Moyen Âge. Boulaine (1996) montre que la superficie des terres arables a diminué de 35 % (passant de  $14.30 \cdot 10^6$  à  $9.23 \cdot 10^6$  ha) du fait de l'augmentation des rendements. Parallèlement, la surface des prairies permanentes et surtout des forêts a progressé. Un tel changement d'occupation du sol est favorable au stockage du carbone dans le sol, puisque le sol des prairies et des forêts ( $97.6 \text{ tC.ha}^{-1}$  dans le modèle) est plus riche en carbone que celui des cultures ( $78.6 \text{ tC.ha}^{-1}$  dans le modèle), en supposant, que les sols des forêts et ceux des prairies sont aussi riches en carbone. La conversion de  $4.07 \cdot 10^6$  ha de cultures en forêt

permettrait de stocker potentiellement environ 30 et 40  $10^6$  tC en cent ans pour la France, en prenant en compte le fait que les stocks atteints ne seront pas à l'équilibre. Ce chiffre est à rapprocher de celui obtenu avec notre simulation dans laquelle les trois paramètres environnementaux varient (pratiques agricoles, climat,  $\text{CO}_2$ ), qui donne un stockage d'environ 98  $10^6$  tC pour le  $\text{XX}^{\text{e}}$  siècle, si on ne considère que la France. Cette première comparaison montre que l'effet du changement de couverture végétale serait moins important que celui du changement des pratiques agricoles. La réalisation d'une telle simulation permettrait de préciser ces chiffres et de prendre aussi en compte un autre aspect qui est la diversification des types de cultures récemment observée, alors que le blé était auparavant une culture très majoritaire (SCEES, 2001).

### 5.6.2 Et le siècle futur ?

Ces résultats permettent aussi de proposer quelques perspectives pour le siècle à venir. Quels sont les grands changements probables au cours du siècle prochain en termes de bilans d'eau et de carbone ? L'évolution observée sur le  $\text{XX}^{\text{e}}$  siècle n'étant pas transposable sur le  $\text{XXI}^{\text{e}}$  siècle, il faut d'abord évaluer la variation la plus plausible des trois facteurs environnementaux étudiés.

- Considérons tout d'abord la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. D'après les scénarios de IPCC (IPCC, 2001), la concentration en  $\text{CO}_2$  devrait (au moins) doubler et atteindre 700ppm d'ici 2100. L'impact sur la production de biomasse (+ ~15 %) paraît inférieur aux mesures, qui montrent une augmentation de la productivité comprise entre 30 et 40 % suivant les cultures.
- La température moyenne sur l'Europe d'après le dernier rapport IPCC (IPCC, 2001) augmenterait de 2 à 4°C suivant le scénario proposé. Nous avons mis en évidence au cours du dernier siècle, un impact plutôt faible du climat (du moins en terme de bilan cumulé sur le siècle, car le climat ajoute une variabilité interannuelle importante). Mais, au cours du dernier siècle, la température ne s'est élevée que de 0.8°C. Au cours du prochain siècle, c'est trois à six fois plus. Quel serait son impact sur le bilan de carbone ? L'augmentation de la productivité des cultures-pilotes choisies n'est pas significative dans le cas d'une augmentation de la température, car d'autres facteurs interviennent et limitent la productivité (par exemple, stress hydriques favorisés par des températures plus chaudes). La température, en accélérant la respiration du sol, favorise le départ du carbone du sol. L'évolution des précipitations est déterminante, mais plus délicate à prédire ; la majorité des simulations prévoient une augmentation des précipitations hivernales et une diminution en été pour l'Europe de l'Ouest (IPCC, 2001). En résumé, il est très probable que le réchauffement prévu sur le prochain siècle contribue à un impact négatif en terme de bilan de carbone et contribue à déstocker une partie importante du carbone dans les sols (compte tenu de l'importance du réchauffement).
- Abordons maintenant les conséquences des changements des pratiques agricoles. Si l'on considère en premier les pays d'Europe de l'Ouest où les rendements sont très élevés (8  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  pour le blé, 11  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  pour le maïs), il est peu probable que l'on continue à augmenter les rendements de manière aussi spectaculaire qu'au siècle passé, dans un contexte de surproduction et de respect de l'environnement. Il est donc probable que, pour les pays précités, l'évolution des pratiques agricoles ne permette pas de stocker du carbone de façon importante, puisque la productivité atteindra une valeur plafond. Il est très important de noter que nous avons laissé de côté le travail du sol. Une réduction du labour (en fréquence

d'interventions et en profondeur de sol concernée) permettrait de stocker entre 50 et 70 10<sup>6</sup> tC en 30 ans sur l'Europe de l'Ouest (Smith et al., 2000). Sur les régions à plus faibles rendements comme les pays méditerranéens (si l'on considère l'Europe de l'Ouest) et surtout l'Afrique, il est très probable que la productivité continue à augmenter sur le siècle futur et permettre ainsi de stocker davantage de carbone.

## 6.1 Conclusion générale

Depuis le Néolithique, l'agriculture a pris une place très importante dans notre paysage, au point de plus laisser de place aux végétations naturelles. Elle a subi, en Europe, et depuis une cinquantaine d'années, une véritable révolution des pratiques. Les zones agricoles sont désormais régies par les pratiques culturales et sont moins sujettes aux aléas climatiques. Elles sont totalement dévolues à la production. Cette évolution a permis de multiplier par quatre les rendements du blé sur le dernier siècle (Boulaine, 1996 ; FAO, 2002) importe aujourd'hui de quantifier de tels changements sur l'environnement. On pressent en effet que les cultures ont un fort impact sur les bilans environnementaux par l'artificialisation des milieux qu'elles induisent. Il importe de quantifier ces changements. De plus, si leur rôle environnemental est effectivement défavorable à la biodiversité et aux équilibres écologiques, il reste néanmoins possible d'influer sur les paramètres qui restent à notre disposition pour limiter les impacts négatifs. On peut par exemple substituer un type de culture à un autre pour obtenir des effets plus favorables. Cette thèse s'inscrit dans ce contexte. A ce titre, elle participe à une intégration globale des méthodes agronomiques actuelles, par la voie de la modélisation dans leur contexte climatique et écologique, ouvrant la voie à une évolution raisonnée des pratiques agricoles. Ainsi, ce travail se positionne au carrefour entre la climatologie, l'agronomie et l'écologie. Nous prenons en compte la biosphère naturelle, en lui ajoutant aussi certains aspects caractéristiques de l'anthropisation.

La première étape de la thèse a consisté à améliorer la prise en compte des zones agricoles dans le modèle global de biosphère ORCHIDEE. ORCHIDEE a été couplé pour cela avec le modèle agronomique STICS de l'INRA. Ce couplage repose sur cinq variables calculées par STICS qui sont forcées dans ORCHIDEE qui sont le LAI, le profil racinaire, la hauteur de la végétation, le stress azoté et le calendrier d'irrigation. Cette méthodologie a permis de mettre à profit l'ensemble du savoir-faire apporté par les agronomes, intégré dans le modèle STICS. Deux modifications ont été ajoutées à ORCHIDEE. Le rendement maximum de la photosynthèse a été ajouté pour intégrer de manière implicite l'effet des fertilisants. L'allocation des produits de la photosynthèse vers les feuilles et les racines a été modifiée afin de rétablir la cohérence entre le LAI et la biomasse foliaire, et entre la longueur racinaire et la biomasse racinaire. Ce forçage d'ORCHIDEE par STICS peut être considéré comme l'intégration de l'ensemble des modifications apportées à la fois par les agronomes et par le travail de l'agriculteur sur des plantes qui, à l'origine, étaient naturelles. Cette méthodologie a aussi été employée par Oliso *et al.* (2001, 2002) qui ont forcé le schéma de surface ISBA par STICS. Trois variables sont échangées entre les deux modèles : le LAI, la hauteur du couvert et l'humidité du sol dans la zone racinaire. Une autre approche est utilisée dans la communauté scientifique, et consiste à intégrer directement les paramétrisations spécifiques aux cultures dans les modèles globaux, comme dans les travaux de Kucharik et Brye (2003) sur le modèle IBIS. Quelque soit la méthode choisie, le problème de la disponibilité des

données se pose pour la réalisation de simulations à l'échelle globale (répartition spatiale des différentes cultures, dates de semis, présence ou non de labours, calendriers des fertilisations et des irrigations).

La méthodologie du couplage présente plusieurs avantages :

- STICS a été récemment validé sur de nombreuses cultures tempérées et tropicales et il est accepté par la communauté scientifique nationale. Une centaine de scientifiques participent au développement continu de STICS (numéro spécial de la revue *Agronomie* en cours), ce qui en fait un outil performant et générique inégalé, pour le LSCE qui ne possède pas de compétence agronomique particulière.
- STICS possède des fonctionnalités intéressantes, comme la possibilité de calculer le calendrier des fertilisations et des irrigations nécessaires pour la culture considérée. Toutefois, la conduite des cultures n'est pas optimisée partout à l'échelle mondiale, et les statistiques de rendements de la FAO par pays et par culture permettent de se faire une idée du degré de sophistication des pratiques agricoles. Connaissant le rendement potentiel climatique calculé par STICS, il serait possible, par optimisation, de retrouver en toute première approximation les doses annuelles de fertilisants et d'irrigations susceptibles d'être nécessaires.

L'approche développée dans ce travail a ses limites :

- La philosophie des deux modèles est différente : ORCHIDEE est un modèle mécaniste qui simule les principaux processus moteurs de la biosphère continentale (photosynthèse, respiration, allocation, phénologie, décomposition). STICS est un modèle plus empirique, initialement conçu pour calculer les rendements. Le couplage présenté comporte des incohérences, notamment par le fait que les bilans d'énergie et hydriques sont calculés en double, de manière indépendante, par les deux modèles.
- Une autre limitation de notre méthode est de pas remettre en cause le modèle STICS, en prenant le risque de ne pas pouvoir l'utiliser en dehors des conditions prévues initialement.

La seconde étape de ce travail est la validation du modèle ORCHIDEE-STICS. Les flux d'eau et de carbone simulés ont été comparés aux observations disponibles sur deux sites américains, le premier est un site blé d'hiver (Ponca), le second est un site de maïs (Bondville). Bien que les variétés employées soient probablement différentes, il y a un bon accord entre les flux simulés et observés. La validation a ensuite été poursuivie à l'échelle de l'Europe, en comparant les indices foliaires simulés avec les données satellitaires. Nous avons montré un assez bon accord entre le modèle et les données. La principale limitation vient principalement du fait que les cultures en C<sub>3</sub> d'hiver et de printemps ne peuvent pas, dans la version actuelle, coexister sur le même point de grille. Les rendements simulés des trois cultures considérés (blé, maïs, soja) ont été comparés aux statistiques de la FAO. Pour le blé, les rendements simulés sont réalistes à l'exception des pays de l'Europe du sud, où ils sont surestimés.

La troisième étape a consisté à évaluer à l'échelle de l'Europe, l'impact des cultures sur les bilans d'eau, d'énergie et de carbone. Trois simulations ont été réalisées, la première avec ORCHIDEE (standard) : les cultures sont assimilées à des prairies naturelles, ce qui constitue une sorte de référence. Les deux autres simulations ont été construites avec ORCHIDEE-STICS, de la manière suivante : dans la première, les cultures d'hiver sont cultures-pilotes ; dans la seconde, ce sont les cultures de printemps. Cette double

comparaison nous a permis de dégager les caractéristiques communes aux cultures. L'importance de la phase du cycle saisonnier a été mise en évidence comme le passage d'une culture d'hiver à une culture de printemps. Ces deux expériences, un peu extrêmes, permettent de cerner une réalité située entre les deux, pour la France, les statistiques de la FAO donnent 31 % de cultures de printemps et 69 % de cultures d'hiver. L'objectif n'était pas de représenter les différentes cultures la plus réaliste possible mais d'utiliser le modèle comme un outil d'aide à la décision avec trois types d'utilisation possibles des terres : une prairie, une culture d'hiver ou une culture de printemps en comparant les variations sur les flux à l'interface surface-atmosphère, les rendements, les réserves en eau du sol, et les stocks de carbone du sol. Cette comparaison permet de dégager trois axes de résultats :

- Comparées aux prairies naturelles, les cultures connaissent un cycle saisonnier de l'indice foliaire beaucoup plus marqué. Les flux échangés à l'interface surface-atmosphère verront leur saisonnalité accrue. La température de surface est plus basse au moment du maximum du cycle (printemps pour le blé), et en revanche plus élevée en dehors du cycle végétatif (été ou automne pour le blé).
- Toutes les cultures évaporent moins d'eau annuellement qu'une prairie naturelle en raison d'un cycle saisonnier plus court : les réserves d'eau annuelles sont donc mieux conservées.
- La phase du cycle saisonnier est cruciale : le cycle des cultures d'hiver (comme le blé) est centré sur la période où les précipitations sont abondantes ; les réserves en eau du sol sont moins mises à contribution. Les cultures d'hiver sont donc préférables aux cultures de printemps dans les régions où la ressource en eau est limitée et limitante, à condition que la réserve hydrique se reconstitue en hiver.

Les zones agricoles apparaissent comme une source de carbone pour l'atmosphère car l'essentiel de la biomasse aérienne est exportée du champ et est décomposée sous forme de CO<sub>2</sub> dans l'année. et stockent moins de carbone. En conséquence, les sols agricoles sont les plus pauvres en carbone (Arrouyas *et al.*, 2002).

- Le stockage de carbone dépend davantage de la production de biomasse de la culture considérée que la saisonnalité de la culture (hiver ou printemps). Toutefois, les cultures de printemps (à productivité annuelle égale par ailleurs) semblent absorber davantage de carbone, comme les températures sont plus basses au moment de la récolte (à l'automne au lieu du début de l'été dans le cas de celles d'hiver). La décomposition de la litière est plus lente, une plus grande partie du carbone issu de la litière parvient jusqu'au réservoir de carbone du sol.
- Les pratiques agricoles comme le labour influent sur le stockage de carbone. Nous avons évoqué à plusieurs reprises que s'il était intégré dans ORCHIDEE, les stocks de carbone simulés seraient plus réalistes. L'exportation des tiges et des feuilles, lors de la récolte contribue à diminuer les stocks de carbone d'environ 30%.

Dans la quatrième étape de la thèse, nous avons cherché à évaluer l'impact de l'évolution des facteurs externes que sont le climat, le CO<sub>2</sub> et les pratiques agricoles durant le siècle passé, sur les agrosystèmes et de leur environnement (réserves hydriques du sol, productivité, stocks de carbone du sol). Trois résultats se dégagent :

- L'augmentation du CO<sub>2</sub> renforce la photosynthèse, particulièrement celle des plantes en C<sub>3</sub>. La biomasse du blé augmente d'environ 10 %, celle du maïs varie peu car la courbe de réponse de la photosynthèse à la concentration en CO<sub>2</sub> des plantes en C<sub>4</sub> étant déjà « saturante », même pour les concentrations du début du siècle. La

hausse de la biomasse du blé permet d'augmenter les stocks de carbone des sols agricoles de 3 ou 4 %. L'ETR varie peu car deux effets se compensent : l'augmentation du rendement de la photosynthèse élève la transpiration mais la résistance stomatique est plus grande ce qui diminue la transpiration. En conséquence, les réserves hydriques sont quasi-inchangées.

- Le réchauffement observé d'environ 0.8°C accélère la respiration du sol et le départ de carbone vers l'atmosphère (de 4 ou 5 %). La hausse de la température n'a pas d'effet significatif sur la production de biomasse annuelle du blé car la hausse du rendement de la photosynthèse est contrebalancée par le raccourcissement du cycle végétatif de la culture. La biomasse du maïs augmente de 3 ou 4 %, à condition que la culture soit irriguée. Le réchauffement de l'atmosphère favorise aussi la demande climatique et donc l'ETR. Les réserves hydriques sont donc davantage mises à contribution, plus particulièrement sur les zones sensibles (Espagne, par exemple).
- C'est l'évolution des pratiques culturales qui a le plus profondément marqué le système agricole dans son ensemble sur le siècle dernier. Elles ont permis le triplement, ou plus (suivant les régions), des rendements du blé et du maïs. Elles favorisent le stockage de carbone dans le sol de 12 t.ha<sup>-1</sup> (en moyenne, soit 20 % environ, par rapport aux stocks du début du siècle). Toutefois, cet avis doit être nuancé ; il s'agit simplement du reflet de l'évolution de la productivité, et nous n'avons pas fait évoluer le labour ou la part de biomasse destinée à l'exportation. En réponse, à la fois à l'allongement de la durée du cycle végétatif et à l'augmentation de la productivité, les réserves hydriques sont davantage mises à contribution et diminuent d'environ 10 %.

## 6.2 Perspectives

Deux voies apparaissent dans la continuité de ce travail. Nous évoquerons d'abord les développements à apporter à ORCHIDEE-STICS, au vu des résultats. Ensuite, nous présenterons les applications que nous aurions aimé réaliser si le temps imparti avait été plus grand.

Cinq améliorations apparaissent importantes à apporter à ORCHIDEE-STICS. Les deux premières sont des variables supplémentaires calculées par STICS qu'il serait souhaitable d'assimiler dans ORCHIDEE pour améliorer le calcul de l'allocation. Les trois suivantes concernent respectivement l'intégration du labour dans le modèle, l'ajout d'un nouveau PFT pour représenter les cultures de printemps en C<sub>3</sub>, et enfin l'extension du modèle à d'autres cultures européennes déjà simulées par STICS.

- **Assimiler la surface spécifique des feuilles (SLA) calculée par STICS** : les travaux d'écophysiologie montrent que le SLA dépend de la phénologie et des stress subis par la plante (eau, azote). Dans ORCHIDEE, le SLA est constant tout au long du cycle saisonnier. Ceci explique la quantité de réserves nécessaires à la croissance largement surestimée pour le maïs. Le SLA n'est calculé que dans la version 5 de STICS.
- **Assimiler la fraction d'assimilats destinée aux grains calculée par STICS** : la fraction d'assimilats allouée vers les grains a augmenté par les sélections génétiques successives au cours des cinquante dernières années. Dans les conditions du début du siècle, les rendements simulés sont surestimés. Les fractions d'allocation ont été calibrées sur les variétés actuelles. Ainsi, l'évolution saisonnière de la fraction

d'allocation sera mieux simulée.

- **Introduire le labour** dans ORCHIDEE permettrait de simuler des stocks de carbone agricole de manière plus réaliste. Le labour contribue en effet à diminuer jusqu'à 30 % les stocks de carbone du sol. Pour le représenter, on pourrait adapter à ORCHIDEE les paramétrisations des modèles de sol agricoles comme SUNDIAL ou RothC. Il faudra probablement introduire une discrétisation verticale dans la représentation des réservoirs de carbone afin de distinguer la couche labourée et celle non labourée.
- **Introduire un type fonctionnel de plante pour les cultures de printemps en C<sub>3</sub>**. En effet, nous avons montré que la saisonnalité de la culture (hiver ou printemps) détermine celle des flux échangés entre la surface et l'atmosphère. Il est donc primordial de représenter simultanément les cultures de printemps.
- **Etendre le modèle à d'autres cultures européennes**. STICS comprend de nombreuses plantes cultivées européennes (vignes, vergers, pomme de terre, luzerne, betterave, ...) qu'il est possible d'intégrer dans ORCHIDEE. Cependant, il n'est pas souhaitable d'avoir un nombre de PFT agricole très élevé dans le modèle et on réalisera des expériences de sensibilité des bilans d'eau et de carbone simulés aux différentes cultures pour déterminer le niveau de sophistication nécessaire à apporter au modèle.

En revanche, nous laisserons de côté la possibilité d'étendre l'utilisation du modèle à l'échelle mondiale. C'est une perspective beaucoup plus lointaine et incertaine. En effet, les cultures tropicales les répandues comme le sorgho et le mil ne sont pas simulées par STICS, et il n'est pas prévu de développement dans ce sens à court terme.

Parmi les applications susceptibles d'être réalisées avec le modèle, deux axes sont à privilégier :

1) La perspective à long terme dans laquelle est inscrite la thèse est d'évaluer **l'impact des cultures sur le climat**. En introduction, nous avons présenté plusieurs études numériques qui montrent que les zones agricoles (même si leur représentation est simplifiée dans les modèles utilisés pour ces simulations) ont un impact important sur la circulation atmosphérique. Les simulations « off-line » avec une représentation des cultures plus réaliste, ont montré des différences importantes sur la saisonnalité des flux du bilan d'énergie. Les gradients méridiens et zonaux des flux sont donc modifiés, et par voie de conséquence, la circulation atmosphérique.

Afin de mettre en évidence ces différences, ORCHIDEE-STICS sera couplé au modèle de circulation générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMDz). Pour la réalisation de cette simulation, nous pouvons bénéficier de la mise en œuvre du couplage entre ORCHIDEE et LMDz qui déjà opérationnel, ainsi du travail de Yann Meurdesoif au CEA qui a pérennisé le couplage entre ORCHIDEE et STICS.

2) Des simulations « off-line » complémentaires seront réalisées avec ORCHIDEE - STICS, pour mieux documenter **l'évolution des bilans de carbone agricoles sur les XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècle** en lien avec les changements subis par les cultures et leur environnement.

La variation des superficies agricoles au cours du XX<sup>e</sup> siècle a été négligée dans les simulations du chapitre 5. Elle a cependant a des répercussions importantes comme le montre l'étude de Janssens *et al.* (2003) sur les bilans de carbone. Il apparaît donc prioritaire de réaliser la simulation où la distribution et la superficie des cultures évolue au cours du

XX<sup>e</sup>. Pour construire cette simulation nous disposons des données de superficies occupées par les principales cultures par année et par pays (Institut International d'Agriculture jusqu'en 1960 ; FAO après 1960). De plus, la simulation présentée au chapitre 5, où les pratiques agricoles (i.e. augmentation des fertilisants et sélection génétique) pourrait être complétée. Nous avons précédemment évoqué l'importance d'ajouter le labour au modèle. On pourrait prescrire ensuite son évolution sur le XX<sup>e</sup> siècle (des labours de plus en plus profonds à l'exception de la dernière décennie où la tendance s'est inversée).

Si l'on considère maintenant le XXI<sup>e</sup> siècle, la question de l'évolution de la productivité agricole a fait l'objet de nombreuses publications à l'heure actuelle. Ces études montrent généralement que le réchauffement prévu est plutôt favorable aux rendements, malgré le raccourcissement du cycle végétatif (Délecolle *et al.*, 2000) si ces cultures sont irriguées. L'évolution des précipitations sur le prochain siècle est beaucoup plus incertaine. Grâce à son développement en hiver et au printemps, le blé est moins sensible à la sécheresse en Europe, que les cultures de printemps. En revanche, l'évolution des bilans de carbone agricoles sur le XXI<sup>e</sup> est peu documentée en particulier à l'échelle de l'Europe. Pour simuler cette évolution avec ORCHIDEE-STICS, on emploiera une approche comparable à celle décrite au chapitre 5. Le rôle des différents facteurs (climat, CO<sub>2</sub>, pratiques agricoles, utilisation des terres) sera évalué. Les résultats attendus sur le XXI<sup>e</sup> siècle seront probablement très différents de ceux obtenus sur le XX<sup>e</sup> siècle. Les pratiques agricoles (fertilisation, irrigation, phytosanitaires) n'évolueront pas de manière aussi spectaculaire que sur les quarante dernières années, car tout au moins en Europe de l'Ouest les rendements actuels sont proches des rendements potentiels et le souci de préservation de l'environnement est devenu important. Par contre la concentration en CO<sub>2</sub> et le climat montreront une évolution beaucoup plus marquée (au moins un doublement de concentration en CO<sub>2</sub> et un réchauffement de 2 à 4°C). Les différentes données nécessaires à ces simulations sont déjà disponibles. Le scénario climatique futur est celui simulé par le modèle LMDz. L'évolution de l'utilisation des terres agricoles dépend en partie de la politique employée, comme la Politique Agricole Commune. Les économistes de l'INRA de Grignon (P.-A. Jayet, comm. pers.) ont simulé plusieurs scénarios possibles d'évolution des superficies occupées par les principales cultures en fonction de la PAC. On pourra donc prescrire dans un premier temps les pratiques actuelles.

## **Annexes.**

---

### **ANNEXE A**

*Gervois S., Viovy N., de Noblet – Ducoudré N., Ciais P., Brisson N., Seguin B. 2002 Vers une meilleure prise en compte des surfaces cultivées dans un modèle global de biosphère (ORCHIDEE) : Couplage avec un modèle agronomique (STICS). Note scientifique de l'IPSL n°24.*

### **ANNEXE B**

*de Noblet-Ducoudré N., Gervois S., Ciais P., Viovy N., Brisson N., Seguin B., Perrier A. Coupling the soil-vegetation-atmosphere - transfert scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets Agronomie – issue spéciale STICS (sous presse).*

### **ANNEXE C**

Fonctionnement des modèles ORCHIDEE et STICS.



**Vers une meilleure prise en compte des surfaces cultivées dans un modèle global de biosphère (ORCHIDEE) : Couplage avec un modèle agronomique (STICS)**

*Sébastien Gervois (1) Nicolas Viovy (1) Nathalie de Noblet (1) Philippe Ciais (1)*

*(1) Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Bat. 709 Orme des Merisiers  
91191 Gif-sur-Yvette Cedex*

*Nadine Brisson (2) Bernard Seguin (2)*

*(2) INRA - Unité Climat, Sol et Environnement  
Domaine St Paul – Site Agroparc  
84914 Avignon cedex 9*

## Résumé

Au travers de cette étude, nous souhaitons améliorer la représentation des zones agricoles dans le modèle global de biosphère ORCHIDEE. Il est très important de prendre en compte les zones cultivées car elles occupent environ 30% de la superficie de l'Europe de l'Ouest. Nous sommes partis du constat que les cultures sont représentées comme des prairies naturelles dans les modèles globaux comme ORCHIDEE. Pour obtenir une représentation réaliste des cultures, nous avons été amenés à coupler ORCHIDEE avec le modèle agronomique stationnel STICS, spécialement conçu pour reproduire le développement des cultures. Le principe du couplage repose sur le forçage de certaines variables d'ORCHIDEE par des sorties de STICS (indice foliaire, stress azoté, profil racinaire, hauteur du couvert, date de récolte) en laissant en revanche ORCHIDEE calculer le bilan d'eau et de carbone. Nous avons modifié l'allocation pour rétablir la cohérence entre indice foliaire et biomasse des feuilles et introduit la récolte dans ORCHIDEE. Nous présentons pas à pas l'impact de chaque modification effectuée sur les principales variables affectées. Enfin, nous avons effectué une première validation du modèle couplé sur les flux d'eau et de carbone sur deux sites américains de blé et de maïs.

## Abstract

In this study, we try to ameliorate the representation of croplands into the global biosphere model ORCHIDEE. The agrosystems cover about 30% of the West European surface, so they must be integrated into ORCHIDEE. ORCHIDEE was conceived for simulated only natural ecosystem, so it represents croplands like natural grasslands. In order to get a realistic representation of croplands areas, we decided to couple ORCHIDEE with the agronomic model STICS. STICS is especially developed to simulate the growing of crops that depends on climatic variables and agricultural calendar such as date of sowing, irrigation and fertilisation. We present the coupling procedure between the global biosphere model ORCHIDEE and the agronomic model STICS. In the future, we will be able to follow the future evolutions of STICS. The principle consists in forcing ORCHIDEE by five outputs of STICS (LAI, date of harvest, root profile, vegetation height, nitrogen stress). Nevertheless, ORCHIDEE computes the carbon and water balance itself. The allocation was modified in order to conserve the coherence between the LAI and the leaf biomass. We integrated the harvest into ORCHIDEE. We present step by step the impact of each modification on the main concerned variables. We also present the first validation of the coupled model with water and carbon fluxes observed at two fields of wheat and corn, respectively in the US.

## Introduction

Pour simuler à grande échelle les principales fonctions des écosystèmes (photosynthèse, respiration, décomposition), des modèles globaux ont progressivement été développés. Certains de ces modèles ont été conçus pour être couplés à un modèle de circulation générale de l'atmosphère (MCGA). Toutefois, ces modèles ne simulent que la végétation naturelle. Pour progresser, ils doivent désormais rendre compte des agrosystèmes qui recouvrent des surfaces importantes de la planète (10% des surfaces hors glaces et déserts). Nous avons choisi de nous intéresser à l'Europe, les cultures couvrent 25%. Les zones anthropisées (cultures, prairies, forêts gérées, urbanisation) occupent plus de 80% de la superficie de l'Europe (source données CORINE).

Depuis 8000 ans, les activités de l'homme ont transformé considérablement le milieu naturel. Ceci a sans doute un impact important sur le climat. Dans le souci de quantifier cet impact, les premières études végétation / climat ont été réalisées en comparant les végétations anthropisée et naturelle. Les premières études ont porté sur la sensibilité du climat à la déforestation amazonienne (Nobre et al. 1991). D'autres auteurs (Xue et Shukla 1993) ont montré que les sécheresses sahéliennes sont aggravées si la forêt guinéenne est réduite. Plus récemment des études comparables ont été réalisées sur les zones tempérées. De Noblet (2000) a montré une augmentation des températures (environ  $+0.5^{\circ}\text{C}$ ) et des pluies (entre 100 et 200 mm par an) en hiver sur l'Europe de l'Ouest dans le cas de la végétation anthropisée. En été, les températures diminuent de  $0.5^{\circ}\text{C}$ , par l'effet conjoint de l'albédo et de l'évapotranspiration plus élevés. Betts (1999) va dans le même sens en reproduisant un refroidissement d'environ  $2^{\circ}\text{C}$  du fait de l'albédo en été sur l'Europe. Par contre, Zhao et al. (2001) met en évidence un réchauffement en surface en été provoqué par la réduction de l'évaporation. Ces auteurs s'accordent pour confirmer l'impact d'un changement de couverture végétale sur le climat ; toutefois, les appréciations divergent. Dans ces études, la représentation de l'anthropisation est simplifiée : en particulier, les cultures sont assimilées à des prairies. A notre connaissance, jusqu'à présent aucune étude n'a représenté l'agriculture de manière réaliste dans un modèle de circulation générale.

L'objectif de cette étude est d'intégrer les zones cultivées dans le modèle global ORCHIDEE (Krinner et al., en préparation). Celles-ci sont en effet un système très anthropisé : l'agriculteur dirige en effet étroitement leur développement par ses actions (fertilisations, irrigations, sélection génétique).

L'importance des cultures comme ressource alimentaire explique qu'elles aient fait l'objet de très nombreuses études afin d'augmenter la production (Du Monceau, 1761). Ces trente dernières années, les agronomes (Childs et al., 1977) ont mis au point des modèles de croissance de plantes de plus en plus élaborés pour prévoir les rendements d'une culture. Cependant, jusqu'à une époque très récente, il n'y avait que des modèles de croissance calibrés pour une culture donnée. Depuis peu, des modèles de plus en plus génériques ont été développés : STICS de l'INRA (Brisson et al., 1998a), qui est un bon exemple, simule la croissance des principales cultures (blé, maïs, soja, ...), des prairies et bientôt celle des forêts gérées.

Il existe un certain nombre de différences entre ORCHIDEE et STICS (biomasse, profil racinaire, ...) que nous allons détailler. Dans chaque cas, il faut apporter à ORCHIDEE des modifications qui peuvent être considérées comme la contrepartie dans le modèle des actions techniques menées par l'agriculteur dans ses champs. Afin de représenter de façon réaliste les zones agricoles, nous avons choisi de coupler ORCHIDEE avec STICS. Ainsi, notre modèle pourra suivre les évolutions futures de STICS.

Cette étude présente les principales étapes du couplage entre les deux modèles. La robustesse de ce couplage sera mise à l'épreuve. Cette voie semble prometteuse pour aborder l'étape ultérieure qui est l'impact de l'anthropisation sur le climat. Nous allons établir la validation du modèle couplé sur les flux d'eau et de carbone échangés entre la surface et l'atmosphère. Ce sont les variables destinées à être envoyées au MCGA.

## **1. Outils utilisés**

### *1.1 Description des deux modèles utilisés*

ORCHIDEE, (Krinner et al., en préparation) est le modèle de surface développé à l'IPSL. Il simule les échanges entre la végétation et les autres composants des écosystèmes terrestres (atmosphère, sol). Le pas de temps du modèle est court (inférieur à l'heure) car ces échanges doivent être inclus lors du couplage à un MCGA (table 1). La maille élémentaire d'ORCHIDEE comprend plusieurs types de végétation regroupés en 13 types fonctionnels de plantes (PFTs) comme les forêts caduques, les forêts tropicales, ou les cultures en C3. Ainsi, ce modèle peut reconstituer l'évolution naturelle d'une prairie vers la forêt. Il a été développé pour les écosystèmes naturels. ORCHIDEE est composé de trois modules :

- SECHIBA (Ducoudré et al., 1993) calcule les échanges énergétique et hydrique quasi-instantanés (pas de temps inférieur à l'heure). Il calcule aussi la photosynthèse, et le flux net de carbone (Viovy, 1997).
- STOMATE calcule les processus du cycle de carbone (respiration, décomposition de la litière, phénologie, allocation des assimilats vers les différents compartiments...) au pas de temps journalier.
- LPJ : le calcul de la dynamique de la végétation (évolution d'un type de plante à un autre) a été extrait du modèle LPJ (Sitch et al., 2000). Dans cette étude, ce module n'a pas été activé : nous avons forcé dans ORCHIDEE la répartition des PFTs.

Le modèle agronomique STICS (Brisson et al., 1998a) est un modèle empirique, conçu pour prédire les rendements d'une culture donnée. Il calcule aussi des variables comme la température de surface, la biomasse, l'indice foliaire ou la transpiration. Ses données d'entrée (table 1) sont les variables climatiques ainsi que celles relatives au calendrier agricole (dates de semis, de fertilisation, de labour, d'irrigation).

### *1.2 Point de départ de l'étude : comparaison des cycles saisonniers simulés par les deux modèles*

Comparons les cycles saisonniers de l'indice foliaire (LAI) simulés par chacun des deux modèles. Le LAI (Leaf Area Index) est la surface de feuilles par m<sup>2</sup> de surface au sol, c'est une variable clé qui permet le calcul des principales variables comme la transpiration ou l'albédo. Il est donc particulièrement important de bien le simuler. Nous présentons ici un site de blé d'hiver situé sur le centre l'INRA de Grignon (table 2) sur la saison 1994-95, ainsi qu'un site de maïs de Poitou-Charentes pour l'année 1996. Nous avons choisi ces sites car STICS y a été validé (Brisson et al., 2002). Notons le désaccord important entre les deux modèles (fig. 1). Ce désaccord est le point de départ de notre étude. Comme attendu, le modèle agronomique, qui a été calibré pour les cultures, reproduit fidèlement la réalité. Nous chercherons tout d'abord à interpréter ces différences en vue d'améliorer la représentation du LAI dans ORCHIDEE (cf. 2.1). La solution la plus simple est de forcer le LAI d'ORCHIDEE par celui calculé par STICS. Cependant, ce forçage apparaît insuffisant pour représenter de manière réaliste les principaux processus et nous détaillerons les modifications apportées à ORCHIDEE.

## 2. Principales étapes du couplage et calibration du modèle couplé

Pour représenter de façon réaliste les zones agricoles, nous nous sommes inspirés de la manière dont STICS traitait les cultures. Nous envisageons à terme le couplage avec le MCGA pour tenter de quantifier l'impact des zones agricoles sur le climat. Il est donc nécessaire de conserver ORCHIDEE qui a été conçu pour être couplé à un MCGA. Nous aurions alors pu intégrer les algorithmes de STICS dans ORCHIDEE, mais la solution du couplage entre ORCHIDEE et STICS est préférable car elle permet de suivre les évolutions futures de STICS. Les évolutions futures de STICS sont le reflet presque en temps réel, de l'évolution des pratiques culturales (nouvelles espèces ou variétés, nouvel itinéraire technique). C'est pourquoi nous avons dans cette étude couplé STICS et ORCHIDEE.

Nous avons mis en évidence un certain nombre de désaccords entre ORCHIDEE et STICS. Dans un premier temps, nous avons forcé le LAI d'ORCHIDEE par celui de STICS pour représenter un cycle saisonnier plus réaliste. Ensuite, le rendement de la photosynthèse a été augmenté pour prendre en compte l'effet des engrais. Dans une troisième étape, comme dans ORCHIDEE le calcul du LAI est découplé de celui de la biomasse, nous avons modifié l'allocation vers les feuilles pour rétablir la cohérence entre biomasse foliaire et LAI. D'autres modifications sont apparues importantes à apporter. A la date de récolte calculée par STICS, toute la biomasse aérienne est convertie en litière, les grains exportés. Le profil racinaire et la hauteur du couvert sont constantes dans ORCHIDEE: ces variables seront forcées par celles calculées chaque jour par STICS. Enfin, STICS simule le cycle de l'azote et calcule un stress azoté qui sera imposé à ORCHIDEE. Par contre, il n'y a pas de rétroaction d'ORCHIDEE vers STICS.

### *2.1 Cycle saisonnier de l'indice foliaire*

Le cycle saisonnier du LAI simulé par ORCHIDEE est beaucoup plus long sur les deux sites (fig. 1) et correspondrait plutôt à celui qu'on obtiendrait pour une herbacée naturelle. Au contraire, STICS rend compte des processus suivants:

- l'apport d'azote combiné à la sélection génétique des plants permet d'atteindre des LAIs élevés (entre 5 et 6).
- la sélection génétique des espèces cultivées pour un cycle de végétation le plus court possible.
- les actions appliquées à la culture : labours, date de semis, fertilisations, irrigations...

Dans le cas du blé le cycle saisonnier simulé par STICS est centré sur le printemps. En effet, le blé est généralement une céréale dite d'hiver, semée dès l'automne précédent, et

qui peut ainsi démarrer très vite au tout début du printemps, et être récoltée en juin ou en juillet suivant la latitude et l'année. Le maïs est une culture dite de printemps : semé en avril, il est récolté au début de l'automne. ORCHIDEE qui ne différencie pas les cultures d'hiver et d'été, montre un cycle centré sur l'été dans les deux cas. Toutefois, le démarrage du blé simulé est nettement plus précoce. Dans ORCHIDEE, le nombre de degrés-jours nécessaires au blé ( $180^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ ) est nettement inférieur à celui du maïs ( $400^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ ). La sénescence simulée a lieu presque en même temps pour les deux céréales.

Le LAI est calculé de manière différente dans ces deux modèles :

- Dans STICS, l'indice foliaire est fonction de la somme des températures journalières au-dessus d'un certain seuil. Cette somme est exprimée en degrés-jours depuis la date de semis. Il prend également en compte la densité de semis, un paramètre de vitesse de croissance propre à l'espèce. La croissance peut être limitée par des éventuels stress hydrique et azoté, ou bien, dans le cas du blé, par un manque en vernalisation ou en photopériode. La durée du jour (ou photopériode) est en partie responsable du démarrage de la croissance du blé en février-mars. Le blé d'hiver a besoin d'une période froide durant l'hiver (ou vernalisation) pour sa croissance au début du printemps (Gate 1996).

- Dans ORCHIDEE, la phénologie est calculée avec le modèle développé par Botta (1999). Pour les herbacées, la végétation démarre si la somme des degrés - jours depuis le début de l'année dépasse un seuil critique (ex :  $500^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ ) et si l'humidité du sol est suffisante. En fin de cycle, la sénescence est déclenchée si la température moyenne s'abaisse en dessous d'un certain seuil ( $10^{\circ}\text{C}$  pour les herbacées) ou bien si l'humidité du sol est faible pendant un temps suffisamment long (stress hydrique inférieur à 0,5 pendant quinze jours pour les herbacées). Le rendement de la photosynthèse dépend à la fois des conditions climatiques, de l'âge des feuilles, et de paramètres propres au type fonctionnel de plante. Le rendement de la photosynthèse détermine le calcul de la production primaire nette. Les assimilats sont ensuite répartis entre les divers compartiments que sont les feuilles, les racines, les réserves, les tiges et les grains. Nous détaillerons plus loin le mécanisme de l'allocation (section 2.4). La biomasse foliaire est divisée par la surface spécifique des feuilles prescrite dans ORCHIDEE pour un PFT donné pour obtenir le LAI.

Nous avons choisi de forcer le LAI d'ORCHIDEE par celui calculé par STICS pour simuler un cycle saisonnier plus réaliste. La version obtenue est appelée S1 (table 3). On remarque sur la fig. 3, l'amélioration du calcul de la biomasse. Cependant, le seul forçage du LAI n'est pas suffisant pour simuler de manière réaliste les principaux mécanismes de la plante. Nous allons maintenant présenter les autres modifications nécessaires à apporter (photosynthèse, allocation des assimilats, récolte, bilans d'énergie et hydrique).

## 2.2 Photosynthèse

Le point clé suivant est celui de la production de biomasse. Sur les deux sites précédents, STICS reproduit bien les biomasses aériennes observées (fig. 3). Par contre, ORCHIDEE sous-estime la biomasse aérienne de 30 % dans le cas du blé et 15 % pour le maïs. L'apport d'engrais n'est pas pris en compte dans ORCHIDEE. Il augmente le rendement de la photosynthèse en accroissant la concentration d'enzymes nécessaires à la réaction de la photosynthèse sur le site de carboxylation. Le site de carboxylation est situé dans le chloroplaste, qui est le siège de la réaction de la photosynthèse. La réaction de photosynthèse est activée, et ainsi la production de biomasse. Nous avons distingué deux cas d'une part le blé, d'autre part le maïs.

- Dans ORCHIDEE, la photosynthèse des plantes en C3 (le blé) est calculée par le modèle de Farquhar (1980). La photosynthèse est conditionnée par les valeurs des vitesses de carboxylation ( $V_{cmax}$ ) et de régénération de la Rubisco ( $V_{jmax}$ ) prescrites. La valeur de ces paramètres a été adaptée à partir de l'étude de Wullschleger (1993), soit pour le blé  $V_{cmax}=130$  et  $V_{jmax}=260 \mu\text{mol.s}^{-1}$ . Ces deux paramètres représentent la concentration en Rubisco dans la feuille. En intégrant ces nouvelles valeurs, les graphiques montrent une amélioration sensible (fig.4). Cette version d'ORCHIDEE (LAI forcé + photosynthèse modifiée) est appelée S2.

- Le maïs possède une photosynthèse dite en C4, la photorespiration est inhibée. Ceci s'explique par la différence de cinétique des enzymes PEP-carboxylase et Rubisco. La PEP-carboxylase concentre le  $\text{CO}_2$  d'un facteur dix sur le site de carboxylation. A titre de comparaison, dans le cas du blé, la photorespiration consomme entre la moitié et un tiers du carbone assimilé (Saugier, 1996). Le rendement de la photosynthèse déjà élevé, est moins sensible à la concentration d'azote disponible. Dans ORCHIDEE, la photosynthèse des plantes en C4 est calculée par le modèle de Collatz (1992). De la même façon, les mêmes paramètres  $V_{cmax}$  et  $V_{jmax}$ , ont été adaptés à partir des mesures de Wullschleger (1993). Nous avons retenu  $V_{cmax} = 110$  et  $V_{jmax} = 220 \mu\text{mol.s}^{-1}$ , soit des valeurs inférieures à celles du blé. Dans la version standard d'ORCHIDEE, les valeurs prescrites, identiques pour les cultures en C3 et C4, valent respectivement  $V_{cmax} = 100$  et  $V_{jmax} = 200 \mu\text{mol.s}^{-1}$ . Ces vitesses de carboxylation correspondent à une teneur optimale en azote pour la culture. Or, si un stress azoté apparaît, comme ORCHIDEE ne possède pas le cycle de l'azote, il ne peut le simuler. Nous verrons en 2.7 comment le représenter dans ORCHIDEE.

### 2.3 Allocation des assimilats

Le cycle saisonnier du LAI est maintenant complètement contraint à partir de STICS. Dans le cas du blé, le cycle est terminé au tout début de l'été. Les conditions thermiques et hydriques sont favorables pour démarrer un nouveau cycle végétatif dans ORCHIDEE. Ceci n'est pas réaliste, d'autant plus que ce redémarrage vide le compartiment « réserves » qui est utilisé pour la croissance de la saison suivante. Aussi, avons-nous inhibé le calcul de la phénologie et de la sénescence dans ORCHIDEE de manière générale, quelque soit le type de culture. Dans ORCHIDEE, la biomasse est répartie en six compartiments génériques: les feuilles, le bois de sève (ici les tiges), les racines, les fruits (ici les grains) et les réserves (dans le cas des céréales une grande partie des réserves de la plante est contenue dans les grains).

Dans la version standard, le calcul de l'allocation est adapté du schéma développé par Friedlingstein (1998). Une fraction de la NPP (Net Primary Production) est allouée respectivement aux fruits ( $f_g$ ), aux tiges ( $f_s$ ), aux feuilles ( $f_l$ ) aux racines ( $f_r$ ), et aux réserves ( $f_e$ ). Ces fractions sont modulées par des fonctions de stress en eau ( $\sigma_w$ ), en lumière ( $\sigma_l$ ), et en azote ( $\sigma_n$ ) qui varient entre 0 et 1, et qui sont définies par :

$$\sigma_w = \max(0.1, \min(1, \frac{\rho_w}{\rho_{wmax}}))$$

$$\sigma_l = \max(0.1, e^{-0.5 \cdot LAI})$$

$$\sigma_n = \min(\sigma_{n1}, \sigma_{n2})$$

où  $\rho_w$  est le rapport mensuel entre la capacité d'absorption racinaire réelle et sa valeur maximale, et  $\sigma_{n1}$  (respectivement  $\sigma_{n2}$ ) est une fonction de l'humidité du sol (respectivement de la température du sol) établie par Friedlingstein et al. (1998). Les fractions d'allocation de la NPP sont calculées à partir des fonctions de stress sur une base journalière:

$$f_g = f_{g0}$$

$$f_s = 3 \cdot f_{s0} \cdot (1 - f_g) \cdot \frac{\min(\sigma_n, \sigma_w)}{2\sigma_l + \min(\sigma_n, \sigma_w)}$$

$$f_l = f_{l0} \cdot (1 - f_g) \cdot \max(0.2, \min(0.5, 1 - f_r - f_s))$$

$$f_r = f_{r0} (1 - f_g) \cdot \max(0.15, \frac{3 \sigma_l}{\sigma_l + 2 \min(\sigma_n, \sigma_w)} + 2 \min(\sigma_n, \sigma_l))$$

où  $f_{r0} = 0.3$  et  $f_{s0} = 0.3$ . S'il apparaît que  $f_r \neq 1 - f_s - f_l - f_g$  alors  $f_r = 1 - f_s - f_l - f_g$

Ensuite, on calcule la NPP allouée aux réserves ( $NPP_e$ ) tout en recalculant celle des autres organes ( $NPP_l$ ,  $NPP_r$ ,  $NPP_s$ ), à l'exception des fruits ( $NPP_g$ ):

$$NPP_e = (1-x) \cdot (1 - f_g) NPP$$

$$NPP_i = x \cdot f_i \cdot (1 - f_g) NPP$$

$$NPP_r = x \cdot f_r \cdot (1 - f_g) NPP$$

$$NPP_s = x \cdot f_s \cdot (1 - f_g) NPP$$

$$\text{Avec } x = \frac{1}{1 + f_i + f_r + f_s}$$

Ces paramétrisations posent problème dans le cas où le LAI d'ORCHIDEE est forcé. La biomasse aérienne d'ORCHIDEE est maximum au moment de la récolte, alors que le LAI de STICS est devenu nul (plante physiologiquement morte). Nous perdons la cohérence entre biomasse des feuilles et LAI. Pour la conserver, nous avons modifié la quantité d'assimilats à allouer vers les feuilles ( $NPP'_i$ ), le signe prime représentant le nouveau calcul de l'allocation.

$$NPP'_i = \frac{dLAI}{dt} \cdot \frac{1}{sla}$$

$dLAI / dt$  est l'incrément journalier de LAI calculé par STICS (section 2.1) et  $1 / sla$  est la surface spécifique ( $60 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$  pour le blé et  $80 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$  pour le maïs) d'après Grégory et al. (1997). De la même façon, il est nécessaire de conserver une cohérence entre biomasse des racines dans ORCHIDEE et longueur racinaire dans STICS. Dans STICS, la longueur racinaire est simulée chaque jour. On calcule d'abord la profondeur ( $Z_r$ ) atteinte par le front racinaire en fonction de la température optimale pour la culture ( $T_{opt}$ ), et de la température du sol à la profondeur du front racinaire ( $T_{sol}$ ).

$$\frac{d(Z_r)}{dt} = C_r \cdot \zeta_r \cdot \frac{1}{T_{opt} - T_{sol}}$$

Où  $C_r$  est une constante fonction de l'espèce, et  $\zeta_r$  est une fonction de stress hydrique comprise entre 0 et 1. A la capacité au champ :  $\zeta_r = 1$ , tandis que lorsque le sol est complètement sec ou saturé en eau (anoxie)  $\zeta_r = 0$ . A chaque valeur de  $Z_r$  est associée un profil type de forme sigmoïde modulée par la profondeur de labour et l'éventuelle présence d'obstacle (Brisson, 1998b). Nous sommes ensuite sur l'ensemble du profil la longueur racinaires ( $L_r$ ) et calculons la nouvelle quantité d'assimilats à allouer aux racines ( $NPP'_r$ ) qui assure une cohérence entre ORCHIDEE et STICS :

$$NPP'_r = \frac{d(\sum(L_r))}{dt} \cdot L_{r0}$$

Dans cette expression  $d(\sum(L_r))/dt$  est la différence entre la longueur racinaire intégrée sur le profil du jour et celle de la veille et  $L_{r0}$  est une constante appelée longueur spécifique qui vaut  $18 \cdot 10^3 \text{ cm}\cdot\text{g}^{-1}$  pour le blé et  $9 \cdot 10^3 \text{ cm}\cdot\text{g}^{-1}$  pour le maïs (Gregory et al., 1997).

Le nouveau schéma d'allocation proposé est présenté sur la fig. 5. Chaque jour une production primaire nette (NPP) est calculée par ORCHIDEE. Les quantités  $NPP_i'$  et  $NPP_r'$  sont prélevées sur la NPP. La quantité restante est répartie dans les autres compartiments (tiges, fruits et réserves) avec les proportions calculées par le modèle d'origine d'allocation d'ORCHIDEE.

Si la NPP est insuffisante ( $NPP_i' + NPP_r' > NPP$ ), on puise le complément dans les réserves, et rien n'est alloué vers les compartiments autres que les feuilles et les racines (tiges, réserves, fruits). Si la quantité de réserves devient insuffisante, la quantité allouée vers les feuilles et les racines est diminuée en conséquence. Dans le cas extrême de réserves vides, la quantité d'assimilats alloués vers les feuilles et les racines est égale à la NPP. Le rapport entre la fraction d'allocation vers les feuilles et les racines est conservé. Il est important de noter que dans ce cas nous perdons la cohérence entre la biomasse des feuilles et le LAI, et entre longueur racinaire et biomasse des racines. Pour éviter cela, nous importerons le jour du semis une quantité suffisante de biomasse dans les réserves (i.e.  $250\text{gC.m}^{-2}$ , soit 40% de la récolte) pour assurer l'ensemble de saison de croissance. Dans la réalité, les quantités semées sont bien inférieures (de l'ordre de  $50\text{gC.m}^{-2}$ ) (Gondé et Jussiaux, 1980).

Il nous reste à reproduire l'opération exactement inverse pour la sénescence. Nous prendrons comme convention que la plante est sénescente quand la dérivée du LAI ( $dLAI / dt$ ) est négative. Si c'est le cas, la biomasse foliaire est décrétementée chaque jour d'une quantité  $Q_i$  égale au produit de  $dLAI / dt$  et  $1 / sla$ . La biomasse enlevée est transformée en litière. De même, la quantité de biomasse racinaire transformée en litière est le produit de  $d(\sum(L_r))/dt$  par la longueur spécifique.

L'inconvénient de cette technique est que la surface foliaire spécifique et la longueur racinaire spécifique sont des variables très sensibles aux stress (eau, azote). Il serait largement préférable à l'avenir de faire varier ces deux paramètres en s'appuyant sur les données issues de la bibliographie. Ces paramètres seront calculés par STICS dans la prochaine version.

#### *2.4 Récolte*

Sur la fig. 4, la biomasse aérienne simulée par STICS s'annule brutalement à la récolte qui intervient soit à la fin du printemps dans le cas du blé soit au début de l'automne dans le cas du maïs. Cette disposition doit être intégrée dans ORCHIDEE.

A la date de récolte calculée par STICS, les tiges sont converties en litière (qui se décompose sur place dans ORCHIDEE) et les grains sont exportés. Dans ORCHIDEE, en

première approximation, nous considérerons que la biomasse totale des grains correspond à la somme des réservoirs « fruits » et « réserves » pouvant devenir à l'avenir, qu'un seul et unique réservoir « grains ». Nous avons vérifié que la biomasse de ce réservoir total « grains » est comparable avec le réservoir « grains » de STICS (soit environ de 550 gC.m<sup>-2</sup>) (fig. 6). La surface spécifique est constante tout au long de la saison de végétation dans ORCHIDEE, alors que dans la réalité elle double ou triple (suivant les espèces) entre la levée et le stade de développement maximum.

Nous comparons le contenu des principaux réservoirs de biomasse d'ORCHIDEE avec le nouveau schéma d'allocation et avec la version standard sur le même site de maïs (fig. 6). Les résultats sont plus vraisemblables : il est en effet irréaliste que la biomasse foliaire diminue pendant la saison de croissance en l'absence de stress. Cependant, ces biomasses sont difficiles à comparer avec les résultats de STICS qui ne possède qu'un compartiment « grains » et un compartiment « biomasse aérienne » (dans lequel sont inclus les grains).

Sur la fig. 7, la transformation de la biomasse aérienne (tous compartiments confondus) en litière est visualisée. Dans ORCHIDEE, il y a deux compartiments de litière : métabolique (sucres et cellulose, se décomposant vite) et structurelle (lignine, à décomposition plus lente). Nous avons accéléré la transformation des assimilats en litière en prenant en compte la récolte dans la version couplée. La décomposition de la litière est rapide car elle provient pour moitié du compartiment « tiges » qui est composé d'éléments très labiles qui se dégradent vite. Nous devons probablement à l'avenir proposer une vitesse de dégradation plus lente. Néanmoins, dans la réalité, le labour enfouit la litière et favorise sa décomposition (Prévost 1999).

### *2.5 Profil racinaire*

Dans ORCHIDEE, l'hydrologie du sol est représentée à l'aide du modèle de Choissnel (1977). Le sol est divisé en deux couches, la profondeur totale du sol est fixée égale à 2m. L'épaisseur de chacune des deux couches dépend du contenu en eau du sol (De Rosnay et Polcher, 1998).

Les profils racinaires sont modélisés différemment dans les deux modèles :

- Dans ORCHIDEE, la représentation du profil racinaire est simple. La densité de racines (D) décroît avec la profondeur (z) suivant une fonction exponentielle :

$$D(z) = e^{-Cz}$$

Le coefficient de décroissance ( $c = 4$  pour les herbacées) de cette exponentielle est défini pour un type de plante donné. Il est constant tout au long de l'année.

- Dans STICS, un nouveau profil racinaire est calculé chaque jour. Nous avons déjà évoqué ce calcul à propos de l'allocation des assimilats.

La fig. 8 compare les deux profils racinaires, dans ORCHIDEE, les racines sont plus abondantes en surface, dans STICS, les racines sont à l'inverse plus présentes en profondeur. En réalité, les racines de surface sont moins efficaces. Le profil racinaire simulé par STICS est un profil d'absorption efficace d'eau et d'azote. C'est pourquoi la densité des racines superficielles est bornée à  $0.5\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Nous avons intégré le profil racinaire calculé par STICS dans ORCHIDEE (simulation S4). Le stress hydrique est moins fort (fig. 9). Dans les sites étudiés ici, le stress hydrique n'est pas assez accentué pour intervenir sur l'assimilation (même dans la version S3) et ainsi juger de l'apport de cette modification.

## 2.6 Hauteur du couvert

Les cultures sont plus hautes (entre 80 cm et 2m) que les herbacées naturelles les plus courantes. Nous avons choisi ici de présenter le site de maïs de Poitou-Charentes déjà évoqué. Le couvert du maïs est plus haut que pour le blé : la rugosité atteint 25 cm pour le maïs à son développement maximal, alors qu'ORCHIDEE donne des valeurs de 3 à 5 cm avec la version standard (fig. 10): ce sont des valeurs d'herbacée rase. Dans ORCHIDEE, la rugosité est calculée à partir de la hauteur de végétation et du LAI. Cette hauteur est prescrite pour un type fonctionnel de plante donné, donc constante tout au long de l'année. A l'inverse, la hauteur de végétation est calculée chaque jour dans STICS en fonction du LAI. Il est tout indiqué de forcer la hauteur de végétation d'ORCHIDEE par celle simulée par STICS (simulation S5).

Une rugosité plus forte (donc une résistance aérodynamique plus faible) favorise les échanges hydriques et énergétiques entre la surface et l'atmosphère. Regardons de plus près l'impact de la nouvelle rugosité sur la partition entre les flux de chaleur sensible et latente. Le flux de chaleur latente est peu affecté par le changement de rugosité. En particulier, la transpiration n'est que très peu affectée (fig. 10). Les différences n'excèdent pas  $0.1\text{ mm/j}$  (soit autour de 2%). La transpiration est limitée par trois résistances en série : la résistance stomatique ( $R_s$ ) au niveau de la feuille, la résistance aérodynamique ( $R_a$ ) et la résistance architecturale ( $R_h$ ). Le gradient d'humidité au sein du couvert ( $gradU$ ) intervient

dans cette équation. Le rapport  $I / I_{\max}$  (sans dimension compris entre 0 et 1) représente la fraction du feuillage recouverte d'eau donc indisponible pour la transpiration.  $U_s$  est la capacité d'extraction de l'eau par les racines (sans dimension compris entre 0 et 1).

$$T_r = (1 - I / I_{\max}) \cdot U_s \cdot \text{grad}U / (R_a + R_s + R_h)$$

Examinons comment varie chacun des termes quand la rugosité est multipliée par 8. Pendant la période de développement maximum de la végétation (fig. 10), la résistance aérodynamique est quasiment diminuée d'un facteur 2 ( $40 \text{ sm}^{-1}$  avec la nouvelle version contre  $70\text{-}80 \text{ sm}^{-1}$  avec l'ancienne). La résistance stomatique intégrée sur le couvert (c'est-à-dire la somme des résistances architecturale et stomatique) est pratiquement inchangée (environ  $80 \text{ sm}^{-1}$ ). La résistance totale est passée de  $155 \text{ sm}^{-1}$  à  $120 \text{ sm}^{-1}$  (soit 23%). Le gradient d'humidité dans le couvert est plus faible d'environ 15% (non montré) avec la nouvelle rugosité ce qui compense en grande partie la diminution de la résistance totale. Les échanges énergétiques sont favorisés sous forme sensible. Les différences simulées les plus importantes concernent le flux de chaleur sensible. Dans la simulation S5, le flux de chaleur sensible est augmenté d'environ 10%, ce qui entraîne une diminution de la température de surface d'environ  $0.8^\circ\text{C}$ .

## 2.7 Stress azoté

Sur un site de blé proche de l'INRA d'Avignon sur la saison 1992-1993, la culture a subi un stress azoté important, les biomasses simulées par ORCHIDEE sont beaucoup trop fortes et comparables en valeurs absolues à celles observées dans le cas non stressé (fig.11). Rappelons que STICS calcule le stress azoté en fonction de la demande de la plante et de l'azote disponible. L'azote disponible est fonction de l'apport d'engrais et des conditions du sol (température, humidité). La demande de la plante est établie en fonction de l'espèce et du stade végétatif.

Pour prendre en compte le stress azoté de manière simplifiée dans ORCHIDEE, nous avons multiplié les paramètres  $V_{\max}$  et  $V_{j\max}$  par le stress azoté issu de STICS. Dans ce cas, les biomasses simulées sont nettement plus proches de celle de STICS. La version ainsi constituée est nommée S6. Ces résultats seraient encore améliorés si on considérait qu'une plante stressée en azote favorise l'allocation des assimilats vers les racines aux dépens des parties aériennes.

Nous venons de présenter les principales étapes de mise au point du modèle couplé. Ce sont les modifications les plus importantes à prendre en compte pour une représentation réaliste des cultures. A présent, nous allons présenter les premières validations du modèle couplé que nous venons de développer.

### 3. Validation du modèle sur sites

Il s'agit maintenant de confronter aux observations les simulations réalisées avec la version couplée que nous avons mise au point au chapitre précédent. Nous avons effectué cette première validation sur les flux d'eau et de carbone ainsi que sur l'efficacité de conversion.

#### 3.1 Flux de carbone et d'eau

Les mesures de flux ne sont réalisées que sur un nombre très restreint de sites. Nous avons choisi deux sites du projet Ameriflux : le site de blé de Ponca (Colorado – USA) et le site de maïs de Bondville (Illinois – USA) (Falge et al. 2001). L'ensemble des forçages climatiques pour ORCHIDEE-STICS est disponible sur ces deux sites au pas de temps de la demi-heure. En revanche, les données d'itinéraires techniques nécessaires à STICS ne sont pas disponibles à l'exception de la date de semis. Nous pouvons nous affranchir de ces données puisque STICS peut calculer lui-même cet itinéraire. En effet, si au cours du cycle végétatif, un stress hydrique ou azoté important apparaît, STICS calcule alors le complément à apporter (dose d'engrais ou irrigation). Ceci nous permet de tester le modèle couplé en dehors des sites où l'itinéraire technique est connu de manière précise. La fig. 12 montre les courbes d'évolution des flux de carbone et d'eau échangés entre la surface et l'atmosphère pour le modèle couplé ORCHIDEE-STICS et les données. En raison de la variabilité inter-journalière importante, nous avons choisi de présenter ici les résultats sous forme de moyennes glissantes sur 5 jours.

Considérons tout d'abord le flux de carbone. Les valeurs positives représentent une source de carbone pour l'atmosphère, les valeurs négatives un puits. Le puits de carbone, pendant la saison de végétation de la culture (printemps pour le blé, été pour le maïs), est bien marqué. Ce puits est légèrement sous-estimé sur le site de maïs et surestimé dans le cas du blé sur la période de développement maximum de la végétation. Précisons que les conditions climatiques sont nettement plus froides (5°C en moins sur la température moyenne annuelle) sur le site de maïs (table 2) comparé au blé. Notre modèle couplé est sensible aux conditions thermiques. Dans la réalité, des variétés mieux adaptées à ces conditions plus fraîches ont probablement été semées, ce qui tend à amenuiser les écarts spatiaux de production dus à la variabilité climatique spatiale. C'est pourquoi dans les mesures, le puits de carbone du maïs est plus accentué que celui du blé. Nous avons déjà évoqué la photosynthèse plus efficace du maïs en C4 comparée à celle du blé. ORCHIDEE - STICS ne reproduit pas cette différence en raison des différences climatiques évoquées plus

haut et simule des valeurs de flux net de carbone comparables pour les deux sites (soit un puits d'environ  $9\text{gC.m}^{-2}\text{.jour}^{-1}$  pour la période de développement maximum de la végétation).

Sur le site de blé, on remarque un déphasage entre modèle et données du cycle végétatif. Le cycle végétatif simulé démarre plus lentement. L'écart le plus important concerne les mois de février-mars, l'hiver est relativement froid en Oklahoma comparé à la France. En Oklahoma, ce sont probablement d'autres variétés de blé davantage adaptées à un démarrage rapide à la sortie d'un hiver froid qui sont semées. Nous n'avons pas de mesures de LAI disponibles sur le site pour pouvoir vérifier ce déphasage. De la même façon, la sénescence simulée est retardée d'une dizaine de jours.

Sur le site de maïs, la diminution de la photosynthèse observée entre les jours 220 et 230 est la conséquence d'un stress hydrique provoqué par l'absence de précipitations observées entre les jours 210 et 220 (fig. 13). L'impact de ce stress apparaît également sur les courbes du flux net de carbone et d'évapotranspiration simulés par ORCHIDEE-STICS, mais en avance d'une dizaine de jours sur les observations. Les évapotranspirations simulées sont surestimées d'environ  $1\text{mm.jour}^{-1}$ , durant la période de développement maximum de la végétation précédant le stress ce qui a pour effet d'assécher plus rapidement le sol dans le modèle. Le modèle réagit donc plus rapidement à la période de déficit pluviométrique. Ensuite, entre les jours 220 et 230, STICS simule des irrigations qui neutralisent l'effet du stress hydrique dans le modèle couplé. Dans la réalité, ce stress perdure bien au-delà des premières pluies, jusqu'au jour 240.

Le site de blé est également affecté par un déficit hydrique autour du jour 90 dont on voit l'impact sur le flux net et l'évapotranspiration observés et simulés. Contrairement au cas précédent, le stress intervient pendant la période de croissance de la culture. Il n'y a pas de déphasage entre le modèle et les mesures, l'impact est moins fort dans le modèle. Comme déjà évoqué plus haut, la croissance de la culture est moins rapide dans le modèle, durant la période précédant ce stress. Les évapotranspirations simulées sont moins fortes, le sol a donc tendance à moins s'assécher dans le modèle. Pour cette période, STICS ne simule pas d'irrigation supplémentaire.

Dans les semaines qui suivent la récolte, le flux net montre des valeurs positives jusqu'à  $2\text{gC.m}^{-2}\text{.jour}^{-1}$ . Ce résultat traduit la décomposition de la litière déposée le jour de la récolte. Cette décomposition est bien reproduite dans le modèle couplé dans le cas du maïs. En revanche, sur le site de blé, la décomposition simulée est en avance sur les mesures d'environ 70 jours. Nous pouvons expliquer le pic de flux de carbone mesuré autour du jour 220 par un premier labour qui enfouit la litière déposée le jour de la récolte et favorise sa

décomposition. La décomposition de la litière est facilitée d'une part par des températures élevées (nous sommes autour du 25 juillet) et d'autre part par des précipitations relativement abondantes observées à cette période.

Vers la fin de l'année (à partir du jour 340), sur le site de maïs, le flux net devient négatif (jusqu'à  $-2\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$ ) dans les mesures, traduisant une activité photosynthétique. C'est probablement la repousse d'herbacées. Bien entendu, le modèle couplé ne peut reproduire ce phénomène, l'indice foliaire calculé par STICS (égal à 0 pour cette période) correspond au développement de la culture, et ne prend donc pas en compte le développement d'autres espèces.

L'évaporation du sol est globalement sous-estimée pour les périodes sans végétation (hiver, début du printemps pour le maïs, été, automne pour le blé), la résistance de sol est probablement surestimée dans notre modèle.

### *3.2 Efficience de conversion*

Nous avons également comparé les efficacités de conversion simulées avec les mesures disponibles dans la bibliographie. L'efficacité de conversion est le rapport entre la NPP et le rayonnement absorbé par le couvert. C'est un paramètre qui fait l'objet de nombreuses mesures. Bien que les vitesses de carboxylation ( $V_{\text{cmax}}$ ) prescrites soient plus faibles pour le maïs, ORCHIDEE calcule une efficacité de conversion moyenne sur le site de maïs supérieure de 22 % à celle du site de blé (fig. 14). Ce chiffre est très voisin des études de Gower et al. 1999 et de Ruimy et al. 1994 qui montrent respectivement une différence de 19,9% et de 18,3 % entre les efficacités des plantes en C4 et C3. L'étude de Gower et al. donne des valeurs d'efficacités plus élevées que celles de Ruimy et al. Toutefois, ces chiffres concernent uniquement les cultures alors que ceux de Ruimy et al. considèrent l'ensemble des plantes en C3 et en C4. Il n'est pas très surprenant que les cultures aient une efficacité de conversion plus élevée que les plantes naturelles : tout y est optimisé pour la production. Notons que les efficacités simulées par ORCHIDEE – STICS sont voisines de celles de Gower et al.

## **4. Conclusion et perspectives**

Ces premiers résultats sont encourageants. Ils montrent qu'ORCHIDEE peut être adapté à la simulation des cultures, moyennant un forçage extérieur qui représente d'une certaine manière le travail de l'agriculteur sur son champ. Le modèle couplé simule correctement les cultures tout en restant cohérent avec les algorithmes de la version de départ d'ORCHIDEE. Il apparaît que les cultures optimisées en vue d'un rendement

maximum, sont moins sensibles aux conditions climatiques mais qu'elles dépendent en premier lieu du calendrier technique qui leur est appliqué. Le couplage entre ORCHIDEE et STICS repose sur les variables suivantes: indice foliaire, hauteur du couvert, jour de la fauche, profil racinaire, stress azoté. ORCHIDEE peut alors simuler de manière réaliste les flux échangés sur les zones agricoles ou des variables plus intégrées comme la biomasse.

Dans un avenir proche, nous souhaitons étendre ces simulations à l'échelle régionale en prenant le cas de l'Europe. L'Europe est particulièrement intéressante car les techniques agricoles y sont variées, les données sont nombreuses et facilement accessibles. De plus, l'Europe subit l'influence des gradients thermiques et pluviométriques méridiens et zonaux. La réalisation d'une telle simulation nécessite de collecter pour chacune des principales cultures les données de superficies occupées ainsi que celles concernant le calendrier agricole (date de semis, fertilisations, irrigations). Cette étude servira de point de départ vers d'autres études plus complètes où le modèle ORCHIDEE-STICS sera couplé à un MCGA pour tenter de diagnostiquer l'impact des cultures sur la circulation atmosphérique.

## 5. Bibliographie

Botta A., Viovy N., Ciais P., Friedlingstein P., Monfray P. 1999 A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology* 15, 709 - 725

Betts R.A. 1999 The impact of land-use on the climate of present day. *In Ritchie (editor) Research activities in atmospheric and oceanic modelling CAS/JSCE WGNE report n°28*

Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D, Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E 2002 STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Model validation for wheat and corn. *Agronomie* 22, 69-93

Brisson N. Mary B. Ripoche D. Jeuffroy M.H. Ruget F. Nicoullaud B. Gate P. Devienne-Barret F. Antonioletti R. Durr C. Richard G. Beaudoin N. Recous S. Tayot X. Plenet D. Cellier P. Machet J.M. Meynard J.M. Delécolle R. 1998a STICS a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.

Brisson N. 1998b An analytical solution for the estimation of the critical soil water balance under growing crops. *Hydrology and Earth System Science* 2, 221-231

Brisson N. Perrier A. 1991 A semi-empirical model of bare soil for crop simulation models. *Water Resource Research* 27, 719-727

Childs S.W. Gilley J.R. Splinter W.E. 1977 A simplified model of corn growth under moisture stress. *Trans ASEA* 20(5), 858-865

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

Collatz G.J. Ribas-Carbo M. Berry J.A. 1992 Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust. J. Plant. Physiol.* 19, 519-538

De Noblet N. 2000 Impacts of land-cover change as result of land-use, on the present day climate and on the on the simulated mid-Holocene climate change. *Présentation orale AGU de San Francisco (Etats-Unis) du 15 au 19 décembre 2000*

De Rosnay P., Polcher J. Modelling roots water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrology and Earth system science* 2, 239-255

Ducoudré N., Laval K., Perrier A. 1993 SECHIBA a new set of parametrizations of the hydrologic exchanges at the land/atmosphere interfaces within the LMD atmospheric general circulation model. *J. of Climate* 6, 248-273

Du Monceau D. 1750 Traité de la culture des terres, suivant les principes de M. Tull. *anglais 6 tomes Paris*

Falge E., Baldocchi D., Olson R., Anthoni P., Aubinet M., Clement R., Granier A., Bernhofer C., Hollinger D., Ta Lai C., Kowalsky A., Meyers M., Moors E.J., Munger W., Pilegaard K., Rannik U., Rebmann C., Verma S., and others 2000 Gap Filling Strategies For Defensible Annual Sums Of Net Ecosystem Exchange. *Agr. For. Met.* 170, 71-77

Farquhar G.D., Von Caemmerer S., Berry J.-A. 1980 A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* 149, 78-90

Friedlingstein P., Joel G., Field C.B., Fung Y. 1998 Toward on allocation scheme for global terrestrial carbon model. *Global change Biology* 5, 755-770

- Gate P. 1996 Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. *ITCF & Lavoisier (eds)* 429p.
- Ghaffari A. Cook H.F. Lee H.C. Climate change and winter wheat management : a modelling scenario for south-eastern England *Climatic change* 55 , 509-533
- Gondé R., Jussiaux M. 1980 Cours d'agriculture moderne. *La maison rustique Paris* 619p.
- Gower, S.T., C.J. Kucharik, Norman J.M. 1999 Direct and indirect estimation of leaf area index,  $f_{\text{APAR}}$ , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 70, 29-51
- Gregory P.J., Palta J.A., Batts G.R. 1997 Root systems and root mass ratio - carbon allocation under current and projected atmospheric conditions in arable crops. *Plant and Soil* 187, 221-228
- Krinner G., Viovy N., De Noblet N., Friedlingstein P., Sitch S., Polcher J., Prentice I.C. Lambin V. Ribeiro J. A dynamical global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. (*en préparation*)
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M. 1999 Calculation of nitrogen mineralisation and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science* 50, 549-566
- Nobre C., Sellers P.J., Shukla J. 1991 Amazonian deforestation and regional climate change. *J. of Climate* 4, 957-988
- Prévost P. 1999 Les bases de l'agriculture. *ed. Tec & doc* 254p.
- Parton W., Stewart J., Cole C. 1988 Dynamics of C, N, P, and S in grassland soil: a model. *Biogeochemistry* 5, 109-131
- Ruimy A., Saugier B., and Dedieu G. 1996 TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity. *Glob. Biochemen. Cycles* 10, 269-285
- Ruimy, A., Saugier B., and Dedieu G. 1994 Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* 99, 5263-5283

Saugier B. 1996 Végétation et atmosphère. *Coll. Dominos n°107 ed. Flammarion* 128p.

Sitch S. 2000 The role of vegetation dynamics in the control of atmospheric CO<sub>2</sub> content. *thesis Postman University* 303p.

Viovy N. 1997 Interannality and CO<sub>2</sub> sensitivity of SECHIBA-BGC and coupled SVAT-BGC model, *Phys. Chem. Earth* 21, 489-497

Wullschleger S.D. 1993 Biochemical limitations to carbon assimilation in C<sub>3</sub> plants A retrospective analysis of the A / C<sub>i</sub> curves from 109 species. *J. of Experimental Botany* vol. 44, 262, 907-920

Xue et Shukla 1993 The influence and land surface properties on Sahel climate part I: deforestation. *J. of Climate* 859-863

Zhao M., Pitman A.J., Chase T. 2001 The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dynamics* 17, 467-477

<b>variables de forçage</b>		
	<b>ORCHIDEE</b>	<b>STICS</b>
température de l'air	oui	oui
humidité de l'air	oui	oui
vitesse du vent	oui	oui
rayonnement courtes longueurs d'ondes	oui	oui
rayonnement grandes longueurs d'ondes	oui	non
pression atmosphérique	oui	non
précipitations	oui	oui
date de semis	non	oui
date et dose d'engrais correspondante	non	oui
date et dose d'irrigation	oui	oui
type de culture	C3 / C4	blé, soja, maïs, ...
date du labour	non	oui
<b>processus</b>		
photosynthèse	C3 : Farquhar(1980) C4 : Collatz(1992)	Brisson(1998a)
respiration	Ruimy (1996)	-
allocation	Friedlingstein (1998)	Brisson (1998a)
carbone sol	Parton (1988)	-
cycle de l'azote	-	Mary (1999)
bilan hydrique	Ducoudré (1993)	Brisson (1991)
<b>variables : pronostiques ou diagnostiques</b>		
LAI	diagnostique	prognostique
biomasse aérienne	prognostique	prognostique
contenu en eau du sol	prognostique	prognostique
carbone sol	prognostique	-
profil racinaire	prescrit	diagnostique
température du sol	prognostique	prognostique

Table 1 Caractéristiques des deux modèles utilisés

Tableau des sites											
Nom	Année	Pays	Culture	Tmoy	coordonnées		altitude	LAI	mesures		
									biomasse	évaporation	flux de carbone
Grignon	1994-95	France	blé d'hiver	10	47°51'N	02°41'E	120m	oui	oui	non	non
Poitou-Charentes	1996	France	maïs	11.5	46°05'N	01°17'W	80m	non	oui	oui	non
Avignon	1993-94	France	blé d'hiver	14	43°23'N	04°83'E	80m	non	non	oui	non
Bondville	1997	USA (Illinois)	maïs	11.1	40°00'N	88°17'W	300m	oui	non	oui	oui
Ponca	1997	USA (Oklahoma)	blé d'hiver	16	36°45'N	97°05'W	250m	non	non	oui	oui

Table 2 caractéristiques des 5 sites présentés dans cette étude

nom	LAI	Vcmax	stress azoté	schéma allocation	sénescence	récolte	Profil racinaire	hauteur du couvert
S0(Contrôle)	calculé	100	-	standard	standard	-	prescrit	prescrite
S1	forcé	100	-	standard	standard	-	prescrit	prescrite
S2	forcé	160	-	standard	standard	-	prescrit	prescrite
S3	forcé	160	-	modifié	modifiée	forcée	prescrit	prescrite
S4	forcé	160	-	modifié	modifiée	forcée	forcé	prescrite
S5	forcé	160	-	modifié	modifiée	forcée	forcé	forcée
S6	forcé	160	forcé	modifié	modifiée	forcée	forcé	forcée

Table 3 caractéristiques des simulations présentées

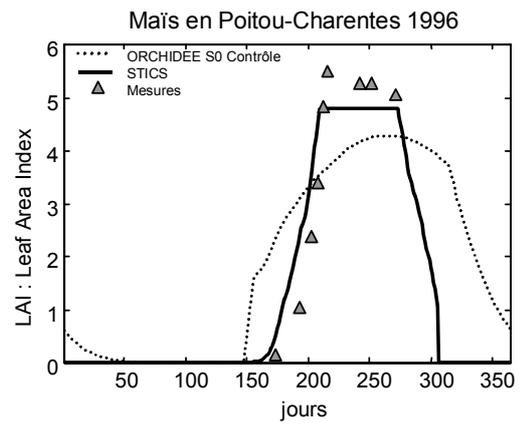
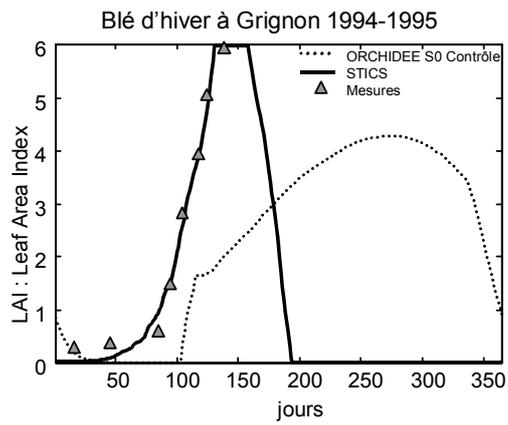


fig. 1 Indices foliaires simulés dans ORCHIDEE S0 (Contrôle)(pointillés), STICS (traits pleins) et les observations (triangles)

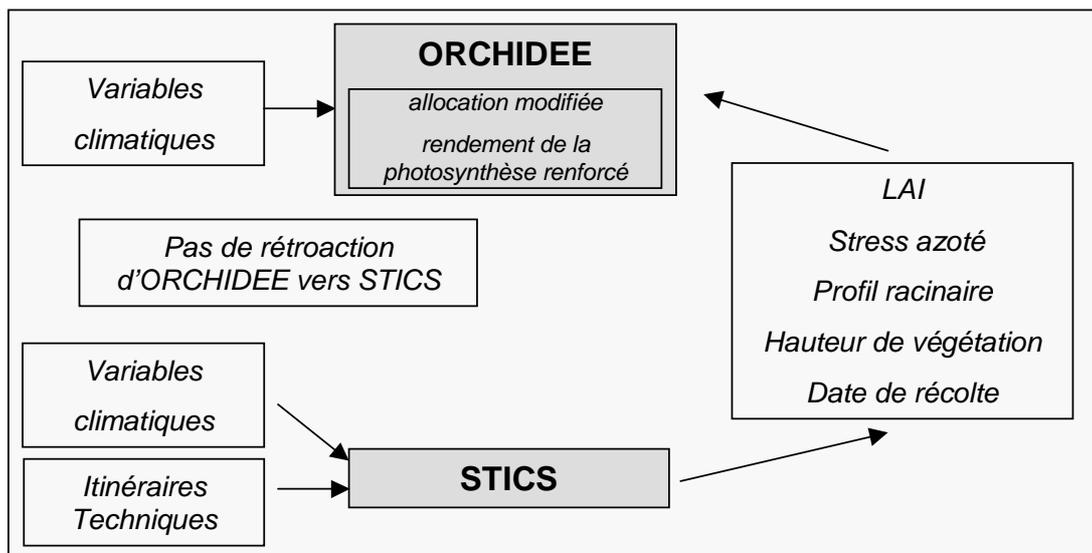


fig. 2 Schéma de couplage entre ORCHIDEE et STICS

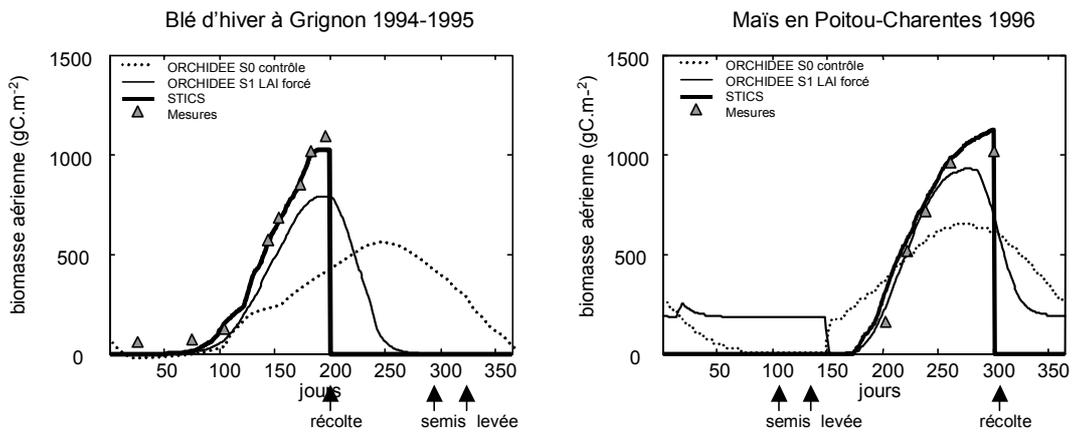


fig. 3 biomasses aériennes simulées dans ORCHIDEE S0 (version standard) (pointillés), ORCHIDEE S1 (forcé par le LAI de STICS) (trait continu fin), STICS (traits pleins épais) et les mesures (triangles)

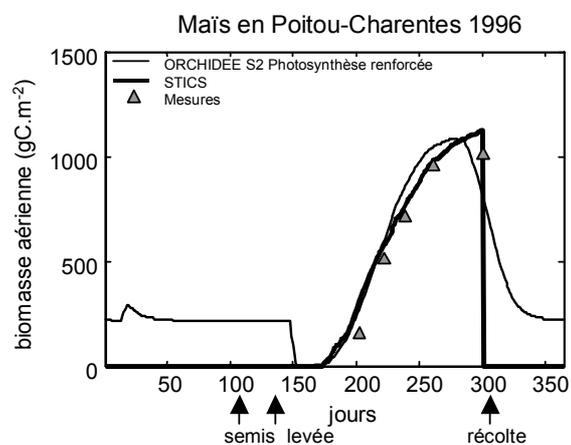
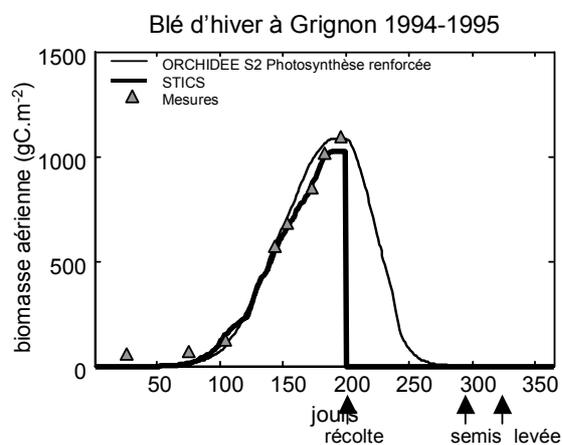


fig.4 biomasses aériennes simulées dans ORCHIDEE S2 (photosynthèse renforcée) (trait continu fin) STICS (traits pleins épais) et les mesures (triangles)

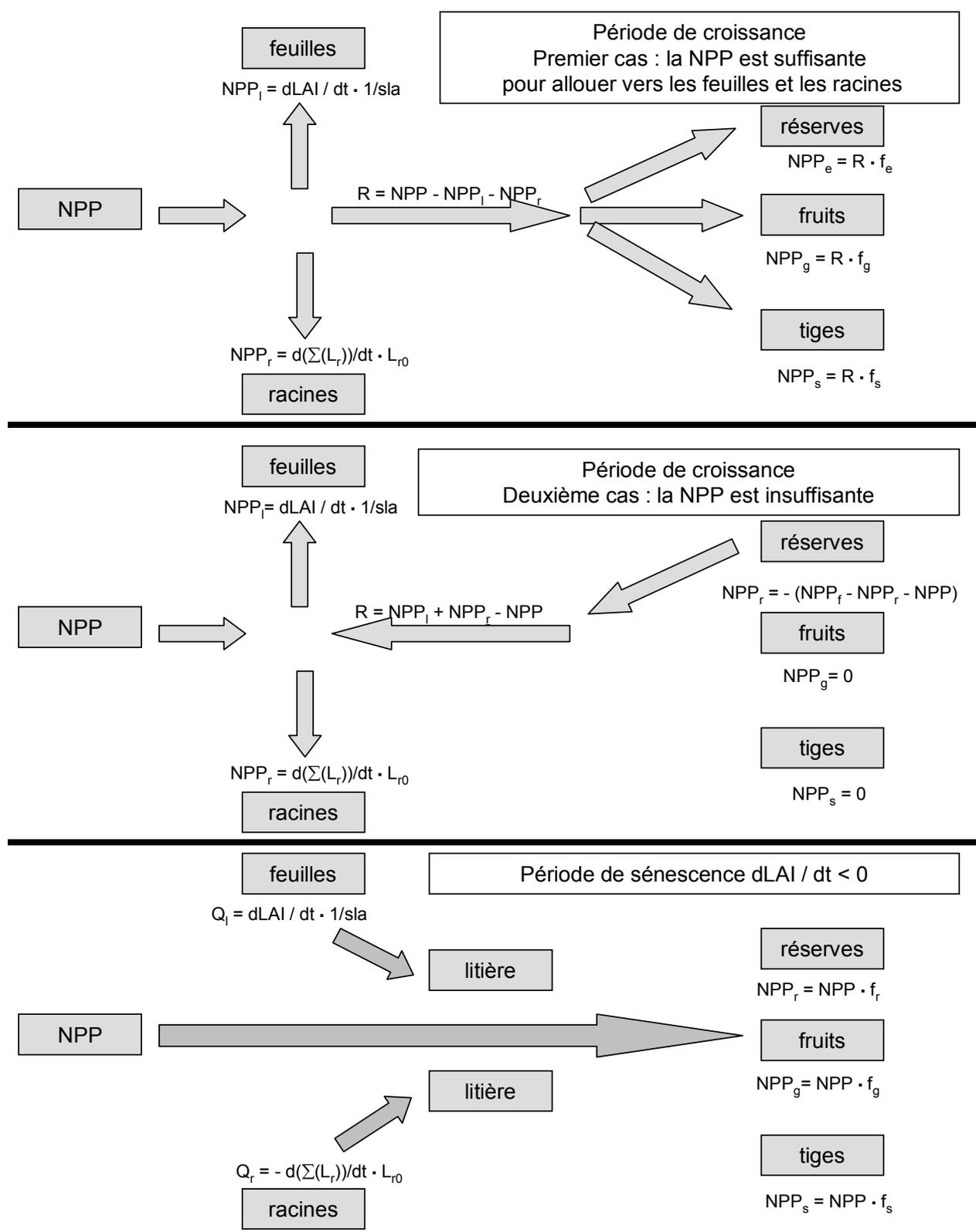
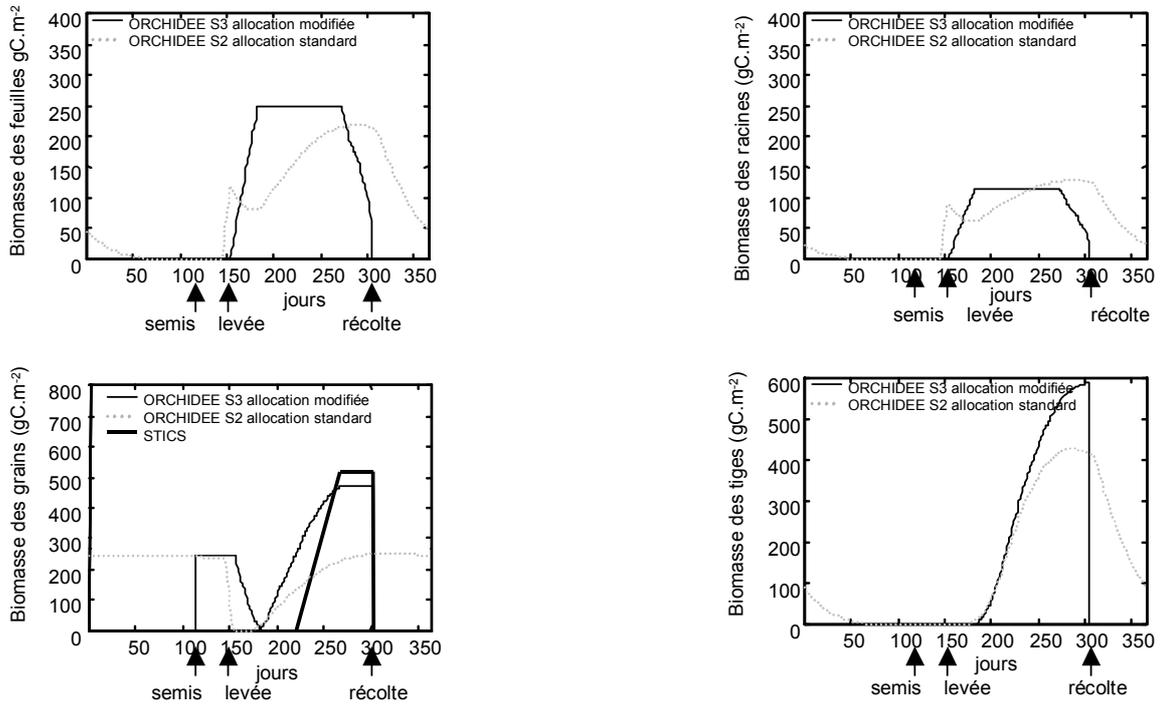


fig. 5 schéma d'allocation proposé dans le cas où le LAI est prescrit.  
La signification des abréviations est donnée dans le texte.

Maïs en Poitou - Charentes



N.B. La biomasse des grains est la somme des biomasses des compartiments fruit et réserves

fig. 6 Simulations avec ORCHIDEE intégrant le schéma d'allocation présenté sur la fig. 5 S3 (trait continu fin) comparées à S2 (trait pointillés) et STICS (trait épais)

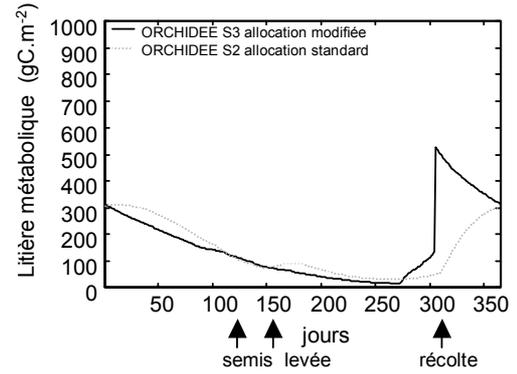
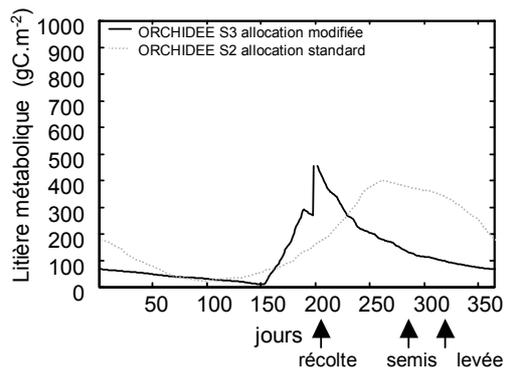
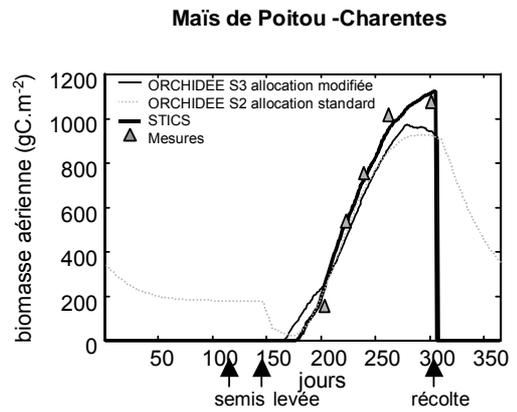
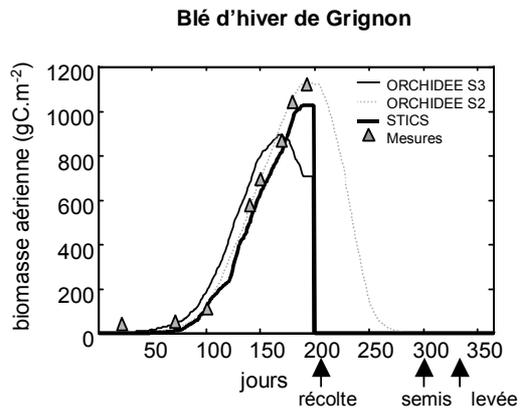
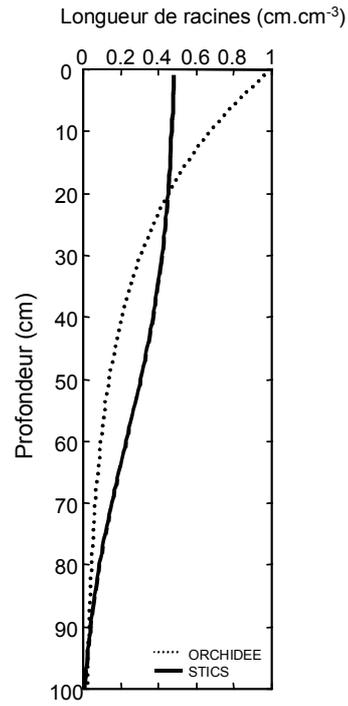


fig. 7 Quantités de biomasse aérienne et de litière simulées avec ORCHIDEE S3 (la date de récolte est forcée par STICS) comparées à S2 (pas de récolte)

Mais en Poitou-Charentes 1996



Le profil racinaire de STICS présenté est le profil moyen sur la période d'extension maximum des racines (jours 210 à 285)

fig. 8 Profil racinaire comparé entre ORCHIDEE version S3 (en pointillés) et STICS (en trait épais)

Maïs en Poitou-Charentes 1996

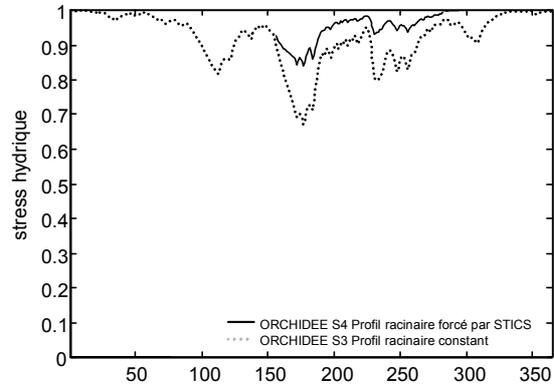


fig. 9 Stress hydrique simulé par ORCHIDEE avec le profil racinaire forcé par STICS (S4) (en trait continu) et prescrit (S3) (en pointillés)

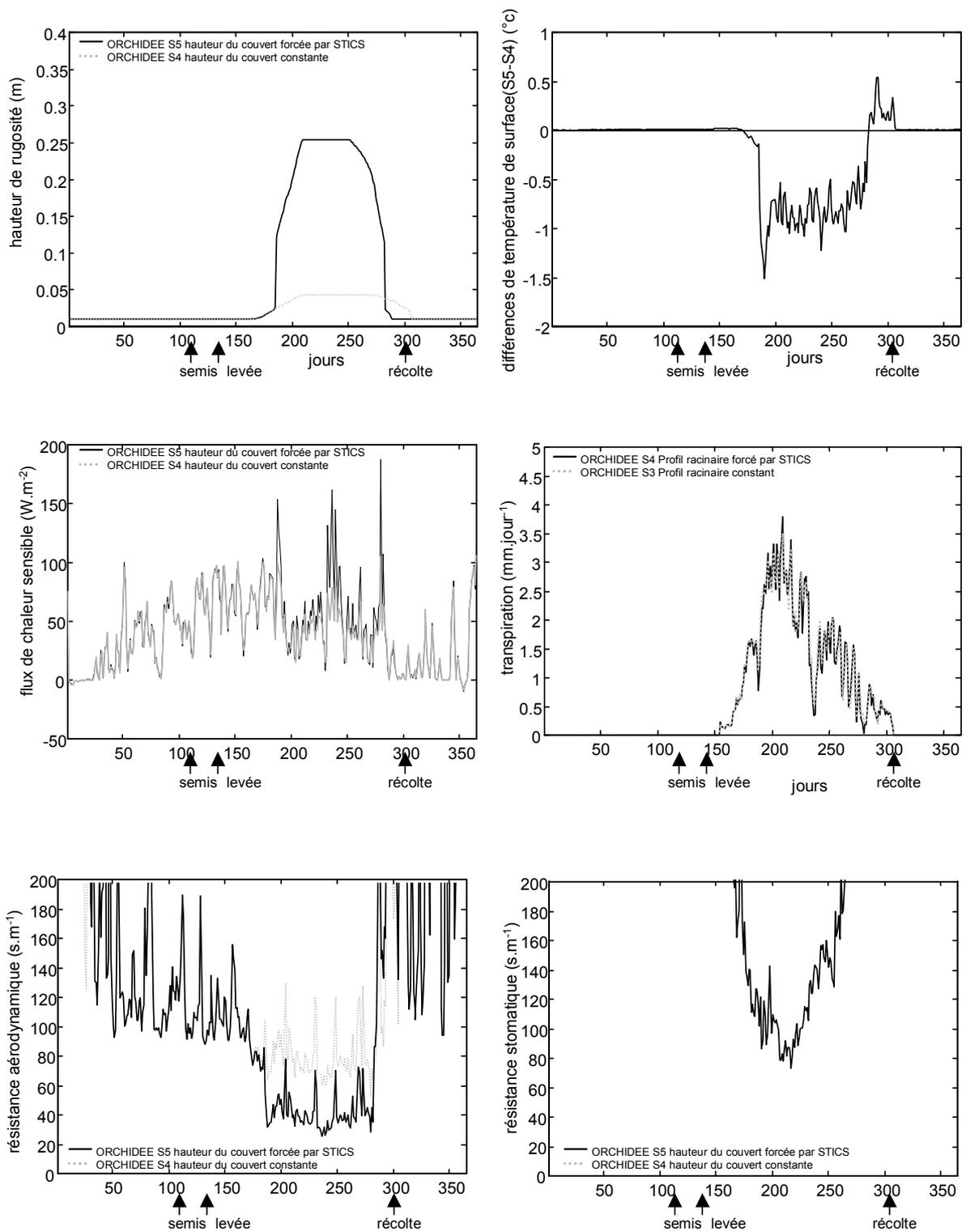


fig. 10 Simulations réalisées avec S5 (hauteur du couvert lue dans STICS) (trait continu noir) et S4 (pointillés gris) (hauteur du couvert prescrite constante) sur le site de maïs de Poitou - Charentes

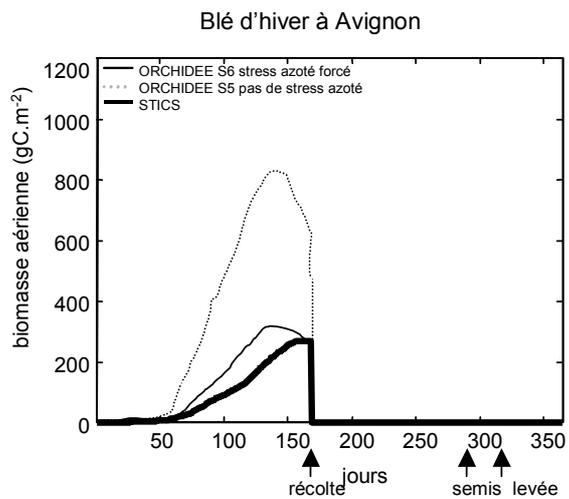
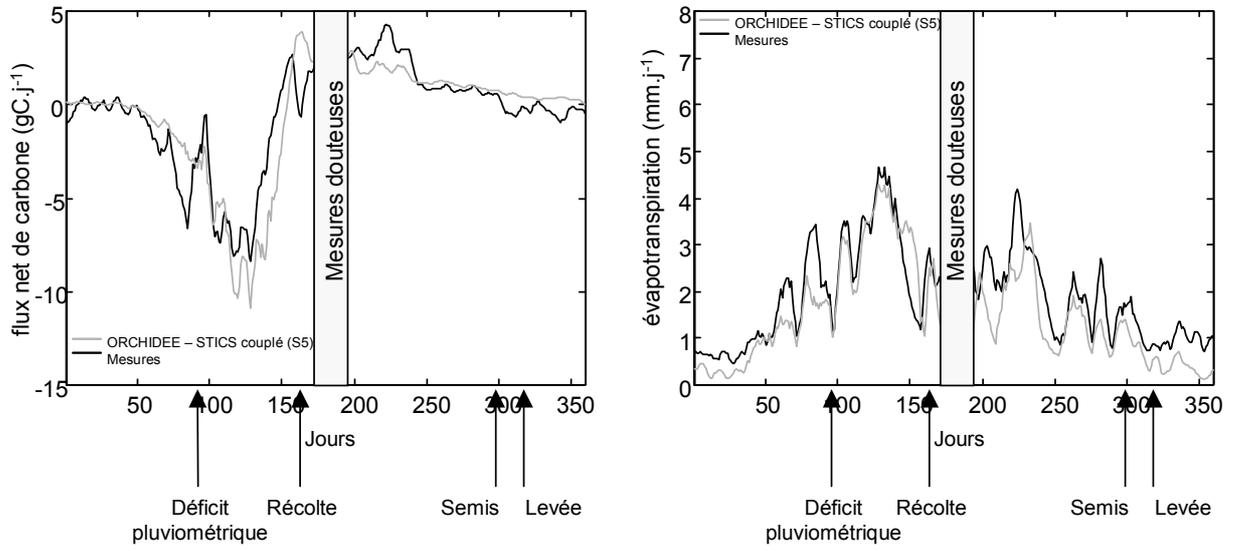


fig. 11 Biomasse aérienne simulée par ORCHIDEE S5 (pas de stress azoté) (en pointillés) et S6 (stress azoté forcé par STICS) (en trait fin) et par STICS (en trait épais) dans le cas d'un site stressé en azote

Site de blé d'hiver de Ponca (Oklahoma)



Site de maïs de Bondville (Illinois)

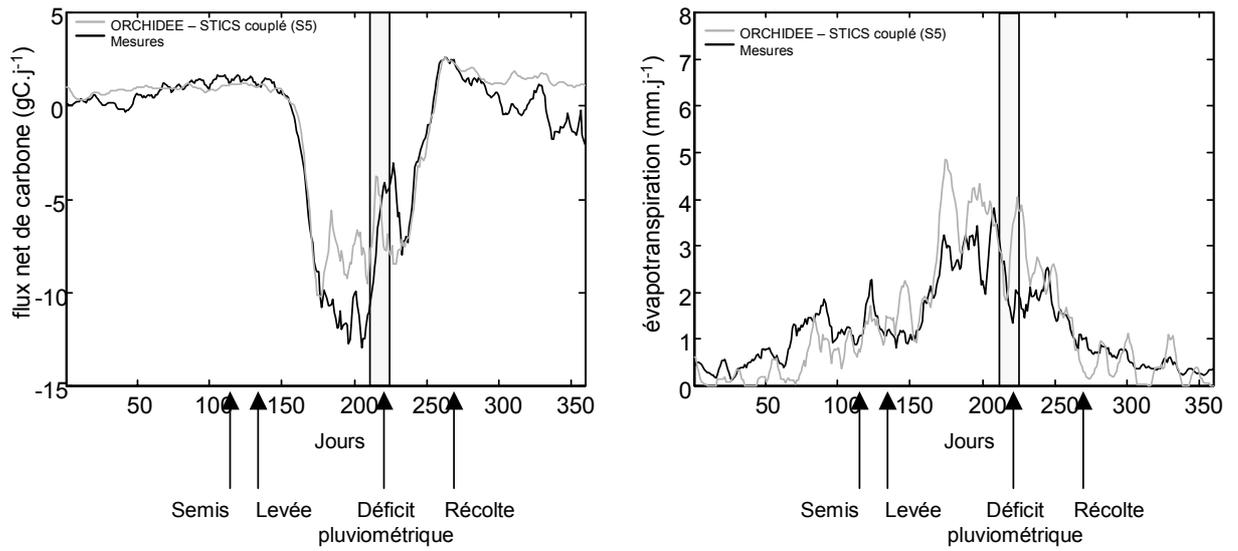


Fig. 12 Comparaison des flux de carbone et d'eau simulés par ORCHIDEE – STICS (S6) (en gris) et les mesures (en noir) pour le site de blé de Ponca (en haut) et le site de maïs de Bondville (en bas). Les courbes présentées sont des moyennes glissantes sur 5 jours.

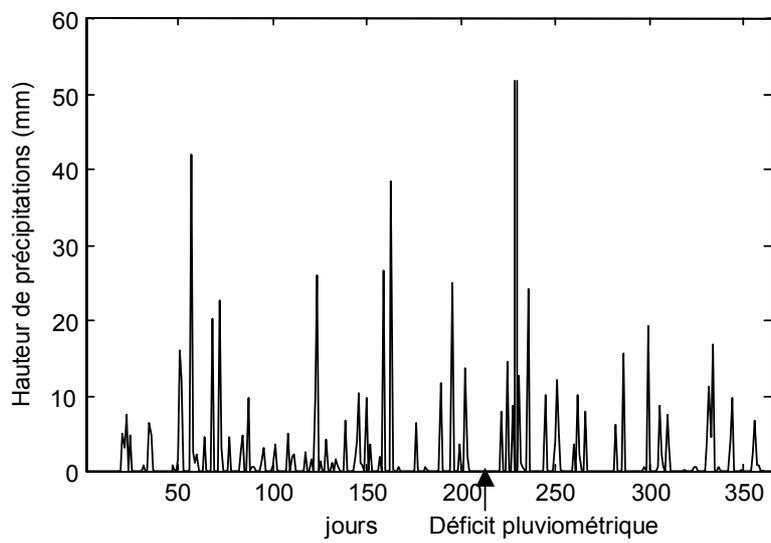


fig. 13 Précipitations quotidiennes mesurées sur le site de Bondville en 1997

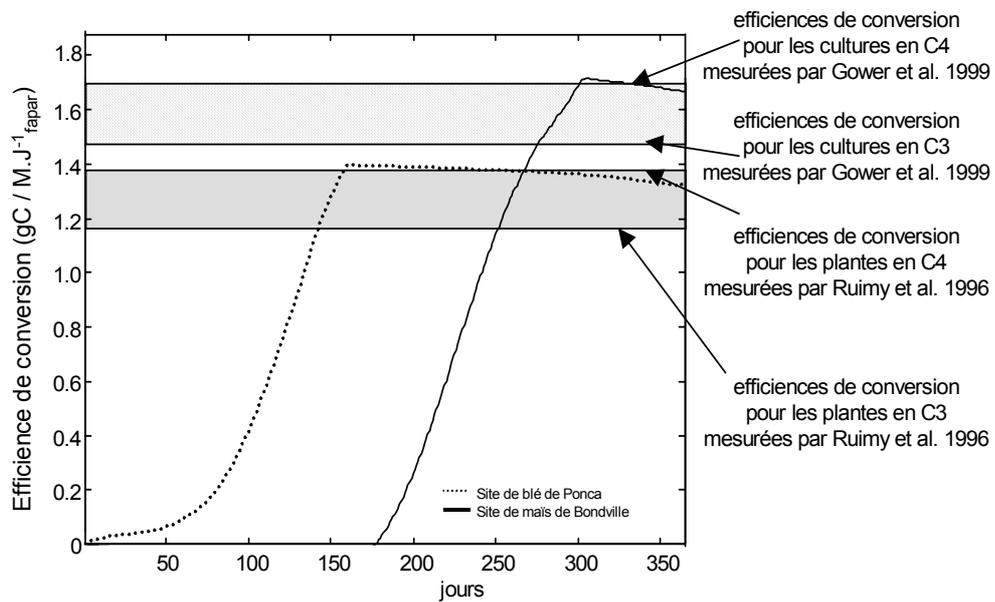


fig. 14 Efficiences de conversion simulées sur le site de blé de Ponca (en pointillés) et sur le site de maïs de Bondville (en trait plein)

# 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

Nathalie de NOBLET-DUCOUDRÉ<sup>a\*</sup>, Sébastien GERVOIS<sup>a</sup>, Philippe CIAIS<sup>a</sup>, Nicolas VIOVY<sup>a</sup>, Nadine BRISSON<sup>b</sup>, Bernard SEGUIN<sup>b</sup>, Alain PERRIER<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Bât. 709, Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

<sup>b</sup> Institut National de Recherche Agronomique (INRA), Unité Climat, Sol et Environnement, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France

<sup>c</sup> INAPG, Chaire de Bioclimatologie, Département AGER, 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05, France

(Received 16 June 2003; accepted 14 May 2004)

**Abstract** – Agriculture is still accounted for in a very simplistic way in the land-surface models which are coupled to climate models, while the area it occupies will significantly increase in the next century according to future scenarios. In order to improve the representation of croplands in a Dynamic Global Vegetation Model named ORCHIDEE (which can be coupled to the IPSL climate model), we have (1) developed a procedure which assimilates some of the variables simulated by a detailed crop model, STICS, and (2) modified some parameterisations to avoid inconsistencies between assimilated and computed variables in ORCHIDEE. Site simulations show that the seasonality of the cropland-atmosphere fluxes of water, energy and CO<sub>2</sub> is strongly modified when more realistic crop parameterisations are introduced in ORCHIDEE. A more realistic representation of wheat and corn croplands over Western Europe leads to a drying out of the atmosphere at the end of summer and during autumn, while the soils remain wetter, specially at the time when winter crops are sowed. The seasonality of net CO<sub>2</sub> uptake fluxes is also enhanced and shortened.

global biosphere modelling / heat and water fluxes / water balance / carbon balance / phenology

## 1. INTRODUCTION

Terrestrial vegetation affects atmospheric composition, surface energy budgets and hence climate through exchanges of water, energy, momentum, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and chemically active species (NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>), and aerosols. Changes in the vegetation composition and in land cover alter those fluxes and therefore have the potential to feed back on the atmospheric circulation and composition.

Many authors have outlined the importance of vegetation in influencing past climates at the regional level. In North Africa, for example, greater summer insolation received 6 000 years ago induced a deepening of the thermal trough over the Sahara, which increased the summer monsoon flow and rainfall, thereby allowing for the growth of grass (e.g. [23]). The latter in turn amplified the process initiated by the change in summer insolation (e.g. [7, 9, 25, 35]).

Another example is the transition between boreal forest and tundra at high northern latitudes which was located at a more southerly position (than today) during the last glacial inception (e.g. 115 000 years ago) and further north during the mid-

Holocene warm period. The last glaciation would not have started without the southward migration of grasses and shrubs, at the expense of forests, inducing a positive feedback via snow-covered vegetation on the insolation-induced cooling (e.g. [10, 16]).

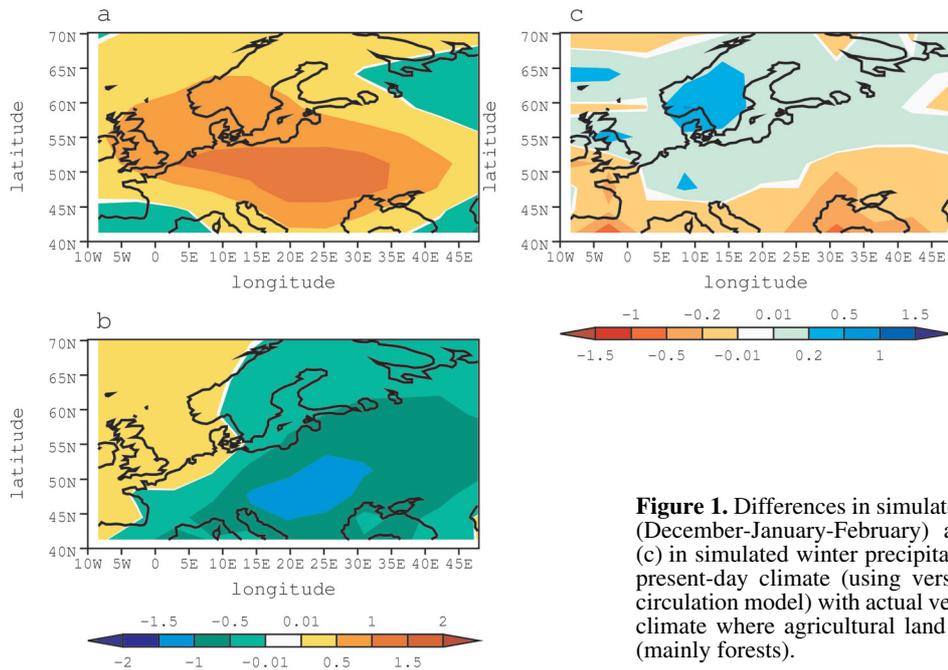
For a long time mankind has modified the landscape [37], clearing forests to grow crops and pastures, and build houses and cities. Numerical simulations of the impact of tropical deforestation in South America have found decreased evapotranspiration rates, increased surface temperatures, and significant changes in water vapour advection from the Atlantic, resulting in changes in the distribution of rainfall over northern South America (e.g. [17, 31, 32, 39]). Tropical land-use changes have been shown to impact on the climate in a similar mode to during an El Niño event [30].

Deforestation also results in large emissions of CO<sub>2</sub> into the atmosphere, thereby enhancing the greenhouse warming effect [21].

Other studies have examined the effects of changes in extratropical land cover on regional climates. Eastman et al. [13], for example, simulated the effect of grazing suppression in the

\* Corresponding author: noblet@lsce.saclay.cea.fr

IPSL = Institut Pierre Simon Laplace, a federation of laboratories in and around Paris (France).



**Figure 1.** Differences in simulated surface air temperature (°C) in (a) winter (December-January-February) and (b) summer (June-July-August), and (c) in simulated winter precipitation (mm/day) between a simulation of the present-day climate (using version 5.3 of the LMD atmospheric general circulation model) with actual vegetation and a simulation of the present-day climate where agricultural land has been replaced by potential vegetation (mainly forests).

Great Plains of the United States after European settlement and found a cooling response in daily maximum temperature associated with reduced precipitation. Heck et al. [20] showed that the suppression of European forests that took place during the past 2 000 years probably led to a moister and cooler spring followed by a drier and warmer summer in the Mediterranean region. Copeland et al. [8] have examined the effect of cropping in the United States and found that current land use was causing the summertime surface conditions to be warmer and wetter than under natural land cover.

Global-scale simulations have also been carried out using simplified climate models (e.g. [5, 26]) or more complex ones (e.g. [1, 6, 19]) and all agreed on the role of land-cover changes (induced by land use) in cooling the Earth's surface when forests are converted to grasslands, thereby opposing the greenhouse warming effect. Figure 1 illustrates the potential impact that cultivated areas may have on the climate of Europe. The simulation, which was carried out using version 5.3 of the IPSL model (<http://www.ipsl.jussieu.fr/~omamce/IPSLCM4>), compares the climate with present-day land cover with climate in a scenario where natural vegetation is potential in all places (i.e. before the extensive European deforestation of the Middle Ages). We simulate milder winters when crops are present, with wetter conditions in northern Europe and drier conditions in the Mediterranean, resulting from an increased advection of heat and moisture from the tropical Atlantic. Summers, on the other hand, are cooler due to increased latent heat flux. European crops do indeed transpire more than a natural forest due to their enhanced photosynthetic capacity that induces a larger canopy conductance. But this numerical experiment, like all the others reported earlier, assumed crops to have the same seasonality as a natural grass (see Sect. 2).

Moreover, future scenarios of changes in vegetation distribution from the IMAGE project [36], resulting from an integrated assessment approach, outline the almost total disappearance of forests in equatorial and tropical Africa in about 40 to 100 years from now, while part of the temperate crops and pastures will be re-forested. The climate impacts of such projected land-cover changes are largely unknown.

Replacing forests with crops also has an indirect effect via changes in the atmospheric greenhouse gas concentrations. Cutting forests to establish arable lands and plowing natural grasslands result in a disturbance of carbon stocks, augmenting erosion and causing net release of  $\text{CO}_2$  to the atmosphere. This loss can be slowed down and even offset by several carbon sequestering practices (e.g. reduced or no tillage, manure application and fallow).

The role of croplands in adding carbon to or removing it from the atmosphere is still highly uncertain, and depends on practice [34], and past land-use history. In the case of European croplands, Vleeshouwers et al. [38], using the CESAR model forced with statistical data and empirical processes, concluded a carbon source of  $400 \text{ TgC y}^{-1}$ , that is,  $\sim 40\%$  of fossil fuel emissions. The uncertainty on this number, however, is very large (on the order of the mean) as discussed in Janssens et al. [22].

The poor representation of crops and pastures in biogeochemical and soil-vegetation-atmosphere transfer global models justifies the improvement of the description of those ecosystems. In a former paper [18] we presented the specific changes we made to our original model (ORCHIDEE) to parameterise crops better. The approach is briefly recalled in Section 2, with a quick presentation of the models. Section 3 shows the performances of the updated model at some selected sites. Section 4 discusses the influence of croplands on the European carbon and water budget.

## 2. MODELS AND COUPLING STRATEGY

The objective is to improve the generic, spatially explicit, carbon-water-energy model ORCHIDEE [24] for use in studies estimating the changes in global carbon sources/sinks and climate, due to human-induced changes in land cover. Instead of introducing specific parameterisations for crops in ORCHIDEE, we rather decided to make use of an existing crop model, STICS [3, 4], specifically designed to represent as accurately as possible the yield and phenology of crops. Only wheat and corn, two dominant crop species grown in Europe, are considered in this preliminary work.

In the “coupled” approach, some variables initially simulated by ORCHIDEE are replaced with the ones computed by STICS. This allows us to use all future improvements that will be made in STICS, with minimum further adjustments of ORCHIDEE. Using STICS in place of ORCHIDEE to force the atmosphere was not possible since the STICS daily time-step lacks adequate description of diurnal fluxes as required by climate models (e.g. water, heat, momentum and  $\text{CO}_2$ ).

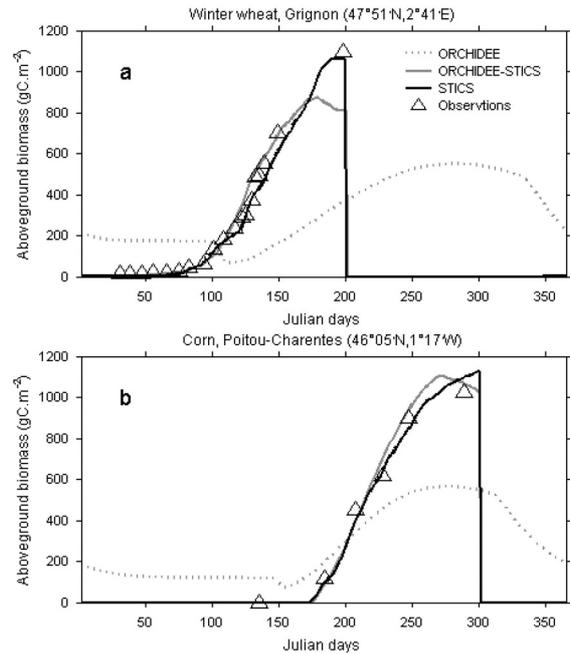
### 2.1. ORCHIDEE (“Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems”)

ORCHIDEE [24] is built on the Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Scheme SECHIBA [11, 12], which was designed to be coupled to atmospheric general circulation models. It computes the “instantaneous” fluxes of momentum, heat, water, the soil water budget and the surface energy budget. Its time-step is half an hour, to ensure numerical stability and to adequately represent the diurnal cycle. The carbon cycle has been added to SECHIBA based on a number of previously published works (e.g. Botta et al. [2] for the phenology; Friedlingstein et al. [15] for allocation processes). Photosynthesis and respiration have been included in SECHIBA since these processes have to be computed at the shortest time-step, while leaf shooting, allocation, litter production, decomposition and the fire index are simulated using a daily time-step. A third module (with a time-step of one year) was taken from the LPJ model [33] to compute the vegetation dynamics (evolution from one vegetation type to another one). In this study, this module was turned off since the distribution of vegetation was always prescribed.

Vegetation types are grouped into ten natural plant functional types (PFTs) (evergreen and deciduous trees and  $\text{C}_4$  and  $\text{C}_3$  grasses), bare soil, and two “super-grasslands”,  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$ , which we name crops but which only differ from natural grass in their prescribed higher rates of carboxylation and Rubisco regeneration. Several PFTs can coexist within the same grid box (also referred to as a mosaic vegetation). They all share the same climate forcing but compute fluxes depending on their own properties. The fluxes are thereafter averaged before entering the first atmospheric level.

### 2.2. STICS (“Simulateur multIDisciplinaire pour les Cultures Standard”)

STICS [3, 4] is a modular crop model developed by INRA (France) as a tool for computing crop yield (amount and quality) and environmental variables (water and nitrogen losses).



**Figure 2.** Time evolution of observed (triangles) and simulated above-ground biomass ( $\text{gC/m}^2$ ). Simulated values from STICS are plotted using the thick black line, while results from ORCHIDEE are plotted using the dark grey line (ORCHIDEE-STICS) and the dotted grey line (ORCHIDEE). Results are shown for (a) winter wheat at Grignon in 1995, and (b) corn in Poitou-Charentes in 1996.

It relies on empirically characterised processes and simulates, daily, the behaviour of crops in the soil-plant-atmosphere continuum (above-ground biomass and its nitrogen content, leaf area index, number of harvested grains and their biomass, soil water and nitrogen budgets, root profile and density, etc.). STICS has been validated and applied to a variety of crops (wheat, corn, tomato, banana, soybean, grassland, vineyards etc.) without any structural changes. Only some parameters and the technical agenda (sowing date, amount of fertilisers, amount of irrigation, etc.) need to be updated depending on the chosen crop type.

STICS is divided into seven modules. The first three calculate the above-ground state of crops (leaf area index and biomass, and allocation to grains), the last four the soil water and nitrogen budgets (there is no explicit soil carbon budget), the root growth and the transfers of water and nutrients between the soil and the above-ground biomass through the roots

### 2.3. Coupling strategy

At two sites (wheat and corn in France) we compared the above-ground biomass (hereafter AGB) simulated by ORCHIDEE in its standard version and by STICS (Fig. 2), as well as the observed AGB. This variable is directly related to foliage density (or leaf area index) which is of particular importance since

In this study, we have used version 4.0 of STICS.

it feeds back on albedo, roughness length and canopy conductances and thereby on turbulent fluxes of latent and sensible heat, and on canopy photosynthesis. ORCHIDEE represents wheat as a natural C3 grass but with enhanced photosynthesis (Fig. 2a) and the pertaining AGB thus closely follows the climatic conditions: a germination in spring and a maximum in late summer. In the real world, wheat is sown in October–November, starts to germinate before winter and reaches maximum AGB in spring before being harvested in early summer.

For corn, even if the AGB timing is not as crucial (Fig. 2b) since this cereal is only sown in spring and therefore germinates at the same time as a natural grass, the amplitude of the simulated AGB is underestimated by ORCHIDEE, despite the prescribed increased photosynthetic capacity which allows more productivity than in a natural grassland. Moreover, the simulated growing season is too long in our model.

The reasons for all these shortcomings of ORCHIDEE relate to crop-specific processes present in STICS (implicitly or explicitly) and absent from ORCHIDEE such as selection of crop species, use of fertilisers to maximise grain yield over short growing cycles, agricultural practices (e.g. ploughing, sowing date, irrigation, harvest date and tillage).

The strategy we adopted to improve ORCHIDEE is to use some of STICS' outputs in place of the ones that are either badly simulated (e.g. leaf area index; hereafter LAI) or missing (e.g. nitrogen stress). Each model is run simultaneously and forced with the same atmospheric forcing and surface characteristics (see Fig. 3 for schematic diagram). Each day STICS provides ORCHIDEE with values of leaf area index, root profile, nitrogen stress and vegetation height. The parameterisations that had to be updated in ORCHIDEE to maintain a basic consistency with input variables from STICS are (1) the allocation procedure and leaf senescence, to ensure consistency between LAI (resp. root profile) and leaf biomass (resp. root biomass), and (2) the soil moisture stress to ensure consistency with the root profile from STICS. Detailed descriptions of these changes and of their impact on the simulated fluxes and biomass can be found in Gervois et al. [18].

We will hereafter refer to our modified version of ORCHIDEE as ORCHIDEE-STICS.

### 3. EVALUATION AT SPECIFIC SITES

#### 3.1. Simulated above-ground biomass at two sites in France

The simulated above-ground biomass using ORCHIDEE-STICS is shown in Figure 2, where a significant improvement can be seen. The biomass increases up to day 160 for winter wheat and day 265 for corn, then decreases following the decrease in leaf area index and the removal of senescent leaves by litterfall. In STICS (and in reality), on the other hand, the decrease in above-ground biomass does not start until harvest. Moreover, the above-ground biomass continues to increase because the filling of grains starts once the LAI has reached its climax. In ORCHIDEE-STICS the allocation of assimilates to grains takes place as soon as net primary production is positive (i.e. since leaf shooting). This is why there is a slight overesti-

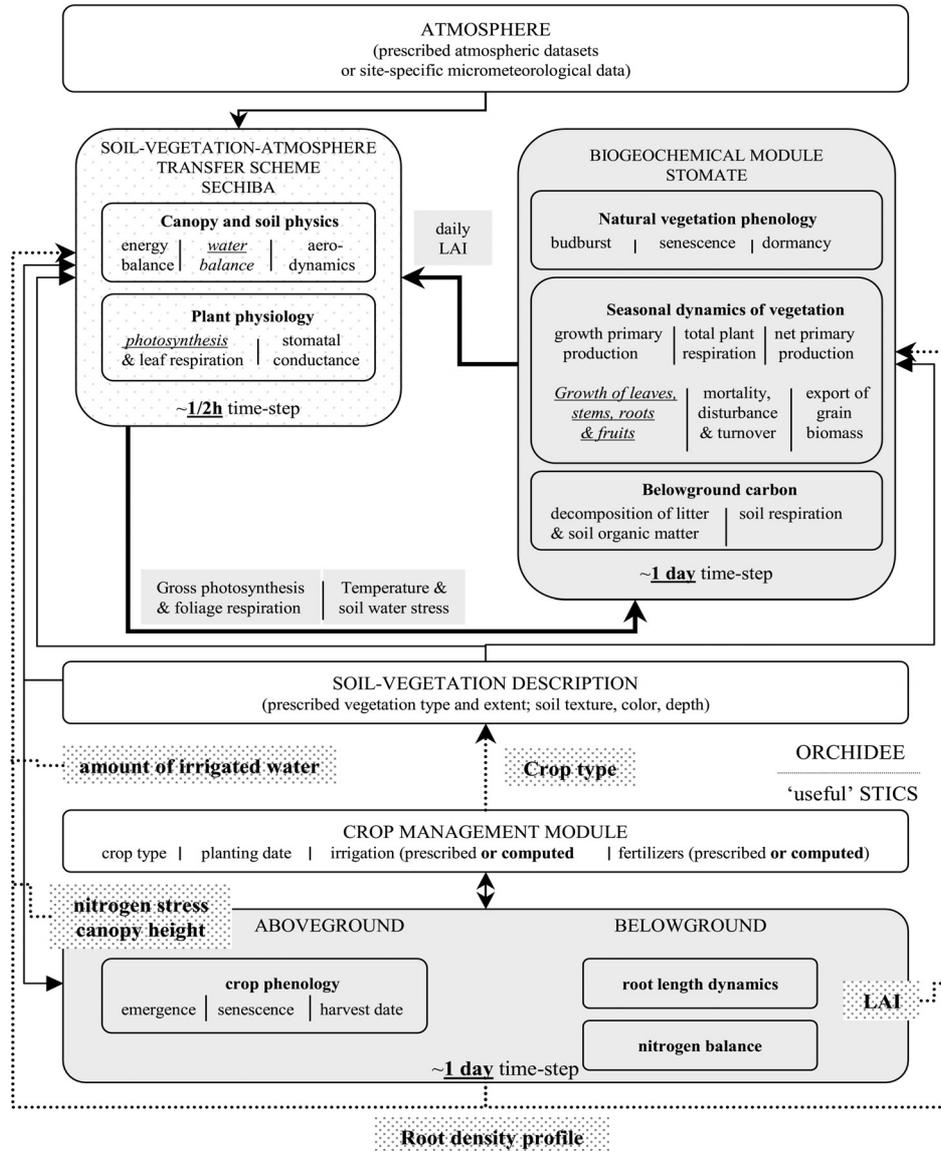
mation of biomass during the growing season in ORCHIDEE at both sites. The simulated grain biomass at harvest is, however, similar in both models ( $\sim 380 \text{ gC/m}^2$  for winter wheat and  $\sim 550 \text{ gC/m}^2$  for corn) and matches the observed values well. Outside the growing season, ORCHIDEE predicts constant above-ground biomass for corn, while there is no biomass in both STICS and the data. This “residual” biomass is an inert reserve put aside in ORCHIDEE, from the harvested grains, to start the next season's growth of leaves. This reservoir therefore mimics the amount of seeds spilled on the ground by the farmer. It is almost null for wheat since emergence occurs in winter, and despite the very small amount of leaves some primary productivity is simulated and allocated to the growth of leaves (reserves are therefore not really necessary in that case).

Table Ia summarises the incremental changes that we made to ORCHIDEE. The two modifications that led to the major changes in total aerial biomass for the wheat and corn sites (Tab. Ib) are the LAI values taken from STICS (from simulation S0 to S1), and the change in allocation (from S2 to S3). After the change in allocation was made, there was no subsequent alteration of the simulated aerial biomass. The changes from S0 to S1 are the most significant improvements in ORCHIDEE if one focuses on the growing season only (numbers in *italic* in Tab. Ib). Very great changes from S5 to S6 were obtained at a site where a strong nitrogen stress was felt. This result is not presented here but discussed in Gervois et al. [18].

#### 3.2. Simulated water and net CO<sub>2</sub> fluxes at two sites in North America

With ORCHIDEE-STICS being able to realistically simulate the biomass growth, we then checked the model against in situ continuous flux measurements by the eddy covariance technique. Two sites of the Ameriflux network [14] were chosen (Fig. 4): a winter wheat field in Ponca (Oklahoma,  $97^{\circ}08'W / 36^{\circ}46'N$ ), and a corn field in Bondville (Illinois,  $88^{\circ}17'W / 40^{\circ}00'N$ ). The meteorological data used as input were those measured at a half-hourly time-step in 1997. Sowing occurred on October 14th 1996 in Ponca (George, pers. comm.), and the 1st of May 1997 in Bondville (Meyers, pers. comm.). All other data on agricultural practices such as the timing and amount of irrigation or fertilisers (if any) were not available and we let STICS compute its own needs depending on its simulated water and nitrogen stress.

In Bondville (corn) the simulated LAI is in very good agreement with the observations (Fig. 4f) and controls the net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub> (NEE) from source to sink (and vice versa, Fig. 4d). Soon after the LAI has reached its maximum value ( $\sim$ day 180), the simulated carbon uptake is not as high as observed, probably reflecting an overestimated water stress (though not sufficient enough for STICS to initiate irrigation) in our simulation. Evapotranspiration (ETR) at peak LAI in ORCHIDEE-STICS (Fig. 4e) is much higher than observed, reducing strongly, and rapidly, the available soil water. Soon after that episode, the simulated ETR decreases together with the CO<sub>2</sub> sink, due to a strong decrease in gross photosynthesis (going from  $19.1$  to  $15.9 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ , while autotrophic respiration goes from  $7.1$  to  $6.2 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ , and heterotrophic respiration from  $2.1$  to  $2.2 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ ). At peak LAI, though, the simulated NEE was remarkably similar to that observed. The



**Figure 3.** Schematic of ORCHIDEE-STICS, an altered version of ORCHIDEE [24]. ORCHIDEE-STICS incorporates agro-ecosystems using crop phenology, crop management (e.g. fertiliser application, irrigation) and nitrogen cycling. Dotted arrows and bold text in dotted boxes indicate the variables that are simulated by STICS and assimilated in ORCHIDEE. Text in *italic and underlined* indicates parameterisations of ORCHIDEE that have been updated. Lightly dashed boxes refer to fast processes (time-step smaller than 1 hour), while grey boxes refer to processes/variables computed daily. White boxes show prescribed variables.

large difference in ETR between the model and observations may result from the selected crop type. We did indeed choose the same characteristics for this American corn type as for the French site in Poitou-Charentes (Sect. 3.1). American corn may be more resistant to rainfall deficit and have a greater water-use efficiency, thereby preventing water loss while preserving large rates of photosynthesis. The strongest rainfall deficit, between days 220 and 230, causes a realistic model response (decrease in ETR and reduced NEE), although about 10 days earlier than observed. Here again, the water stress (even if small) experienced by our model prior to this event is responsible for this rapid response to rainfall, while in reality the stress

was probably felt only after ETR had extracted enough water from the soil.

In Ponca the winter wheat field acts as a net sink of atmospheric  $\text{CO}_2$  between day 40 and day 140, and as a net source the rest of the year (Fig. 4a). This change in behaviour (with respect to  $\text{CO}_2$ ) occurs shortly before harvest (Fig. 4c), at a time when most leaves are senescent and photosynthesis cannot compensate for respiration. ORCHIDEE-STICS reproduces very well the timing from sink to source but with a delay of about 6 days, which we assume is due to a similar delay in the onset of leaves, as suggested by both the too smooth an increase in  $\text{CO}_2$  uptake and the too slow an increase in ETR (Fig. 4b).

**Table I.** Summary of the degree of agreement (expressed in %) between the above-ground biomass simulated by STICS (almost equal to observations) and the one simulated by different versions of ORCHIDEE. (a) Summary of the incremental (step-by-step improvement) versions of ORCHIDEE which are fully described in [18]. (b) The degree of agreement is computed as the integral of the common space covered by the above-ground biomass divided by the integral of the total space covered (including both STICS and ORCHIDEE). In plain text calculations were made throughout the year, while in italic calculations were made for the crop season (from actual emergence to harvest) only.

(a)	
Name of incremental simulations	Description of the version of ORCHIDEE
S0	Standard version
S1	S0 with LAI from STICS
S2	S1 with increased maximum rates of carboxylation and RuBP regeneration
S3	S2 with changes in the allocation and export of grain biomass
S4	S3 with root profile from STICS and change in water stress function
S5	S4 with vegetation height from STICS
S6 (ORCHIDEE-STICS)	S5 with nitrogen stress from STICS

(b)							
Simulations	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Grignon	12.7%	43.4%	37.7%	82.3%	82.3%	82.3%	82.3%
(Wheat)	28.9%	79.9%	71.5%	83.8%	83.8%	83.8%	83.8%
Poitou-Charentes	39.7%	44.5%	46.2%	55.8%	55.8%	55.8%	55.8%
(Corn)	59%	84.7%	91.4%	87%	87%	87%	87%

The amplitude of both quantities, though, as well as the length of the crop season, is well reproduced by ORCHIDEE-STICS. The rainfall deficit experienced by day 90 results in a sharp decrease in ETR and sharp decrease in NEE in the model, in good agreement with the observations. The magnitude of this stress event is smaller, though, in ORCHIDEE-STICS since the simulated area of standing leaves is still quite low (if our hypothesised delay is correct, the real-world LAI should be somewhat larger).

## 4. INFLUENCE OF CROPLANDS ON THE CONTINENTAL SCALE EUROPEAN WATER AND CARBON BUDGETS

### 4.1. Designing a set of simplified simulations

We applied ORCHIDEE-STICS to Western Europe (36°N–55°N; 10°W–19°E) where arable land amounts to a large fraction of the total land cover (~37.5% of Europe; [27]) and is

therefore expected to have a significant impact on regional climates and on the CO<sub>2</sub> fluxes.

Our purpose in this paper is to understand how a better representation of cropland will affect the estimated carbon and surface energy budgets.

We used as input the gridded present-day climate data derived from the ATEAM European-funded project (EVK2-2000-00075; <http://www.pik-potsdam.de/ateam/>). The vegetation map is based on CORINE land cover (1995; <http://reports.eea.eu.int>) for the distribution of natural vegetation and the area occupied by crops, combined with information from the FAO regarding the partitioning between C3 and C4 crops in each country (<http://www.fao.org>).

Two simulations were carried out, at 1° by 1° horizontal resolution:

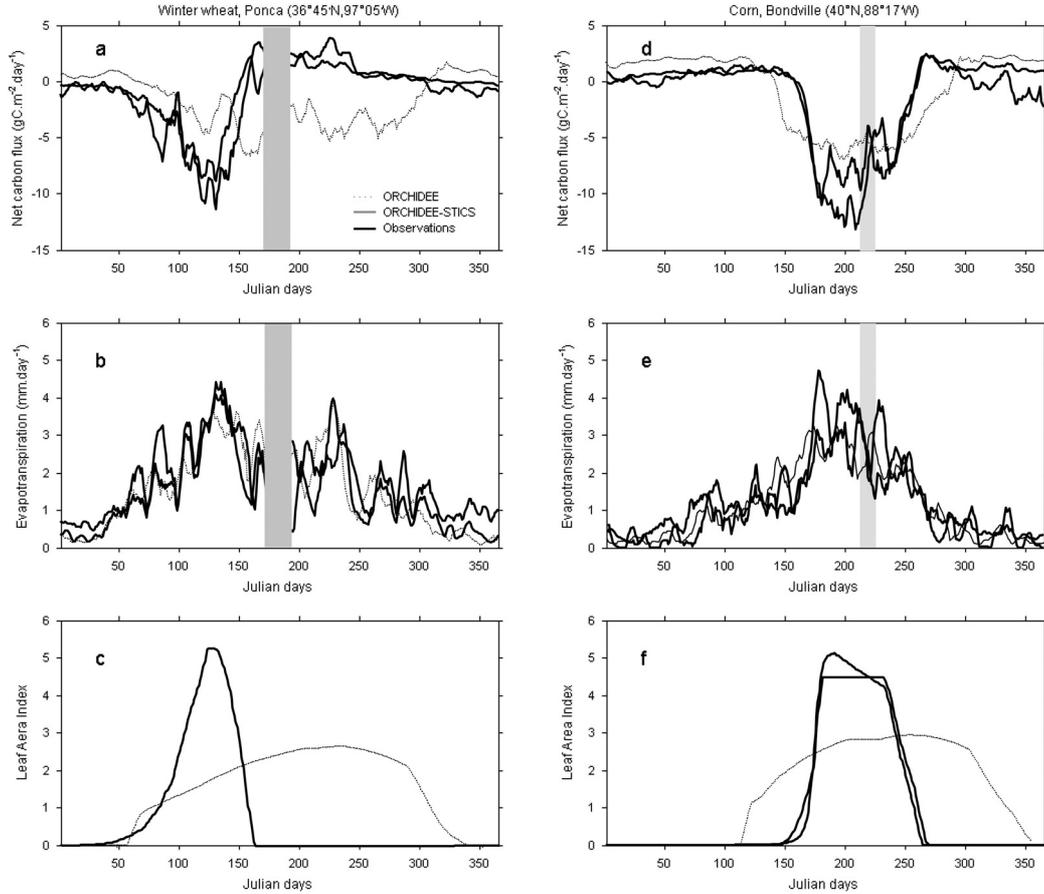
- ◆ NOCROP using the standard version of ORCHIDEE (where crops behave more like a natural grass),
- ◆ CROP using ORCHIDEE-STICS.

In upscaling to the continent, we had to make some arbitrary simplifications regarding the technical agenda which was not available on this scale (or at least not easily available). We chose, in this very first attempt, to describe all C3 crops as winter wheat, and all C4 ones as corn. The sowing date was fixed to October 1st for wheat, and once weekly mean temperature goes above 10 °C for corn. We let fertilisation and irrigation be computed by STICS once the nitrogen and water availability went below a certain threshold. The harvest date is computed using the growing-degree day concept. For all characteristics describing the specificities of each crop (e.g. GPP thresholds and conversion efficiency), we used the same ones as for the French sites described in Section 3. Remark also that the carbon simulations are done under equilibrium conditions, i.e. the annual carbon balance of the crop systems is zero, thus ignoring the effects of the historical climate, CO<sub>2</sub> and management changes on the carbon cycling. Thus the only predictive quantity is the simulated seasonality of NEE.

We are aware that these simplifications are very crude, but we believe that, given the enormous change in seasonality obtained when comparing both versions of ORCHIDEE (see Sects. 2 and 3), the arbitrary choices we have made may only have second-order effects. Moreover, it seems obvious from Table I that the biggest improvement that can be made to a global model concerns LAI seasonality and appropriate redistribution of photosynthate products.

### 4.2. Seasonal evolution of leaf area index

Leaf area index (LAI) is of primary importance since many other variables depend upon its value. The time evolution of LAI, averaged over the model domain, is plotted in Figure 5 for both versions of ORCHIDEE, and compared with satellite data (Fig. 5c). There is almost no seasonal cycle for wheat (Fig. 5a) in the standard simulation (NOCROP), and the growing season is too long for corn (Fig. 5b) in the absence of harvest. Because the area covered by C3 crops is quite large over Europe (~35% compared with ~2.5% for C4 crops), the mean LAI computed considering all other PFTs (natural vegetation) is strongly influenced by winter wheat (Fig. 5c).



**Figure 4.** Time evolution of a number of observed (thick black line) and simulated (thin dark grey line for ORCHIDEE-STICS and dotted grey line for ORCHIDEE) variables at the two American sites: winter wheat in Ponca on the left side and corn in Bondville on the right side. (a) and (d) Net ecosystem exchange ( $\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$ ). Negative values represent a sink of  $\text{CO}_2$  with respect to the atmosphere, while positive values represent a source. (b) and (e) Total evapotranspiration ( $\text{mm}/\text{day}$ ); (c) and (f) leaf area index. All values are presented as 5-day running means to smooth out very high frequencies.

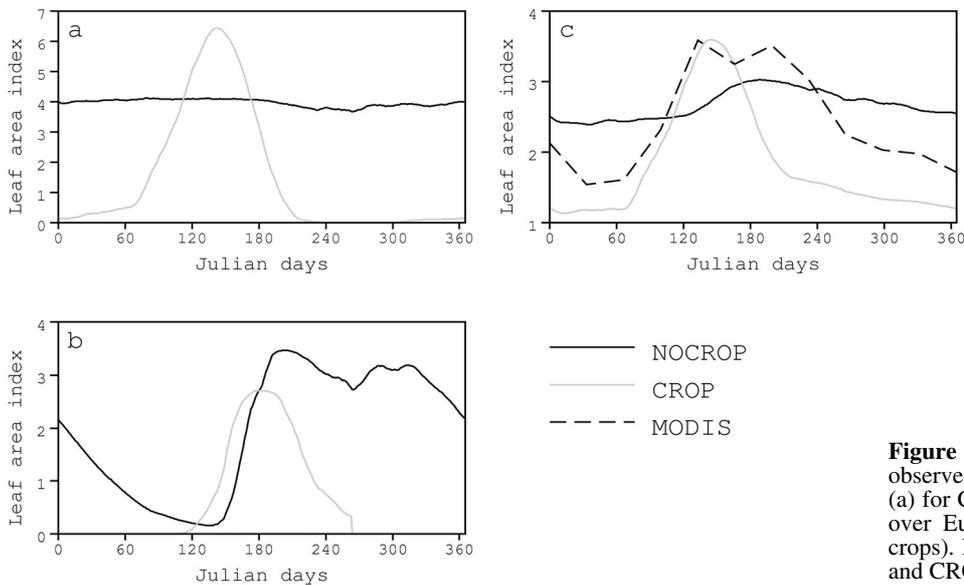
When compared with the LAI derived from the MODIS satellite observations [28], it is obvious that using ORCHIDEE-STICS (CROP) results in a significant improvement. The monthly LAI, though, seems to be underestimated in winter and the growing season seems too short (by about 60 days). During wintertime, this discrepancy could result from the regrowth of grass on cultivated lands, which is not accounted for in our model. The shorter growing season simulated could result from the choice we made to grow only winter wheat, instead of having part of the C3 crops being spring fields. The first peak in satellite observations ( $\sim$ day 120) is indeed indicative of the maximum growth of winter crops, while the second one ( $\sim$ day 210) may be related to spring crops, prairies and deciduous trees. It is obvious from these results that we need to include more than just winter crops in CROP in the future improvement of our code.

### 4.3. Energy and water balance

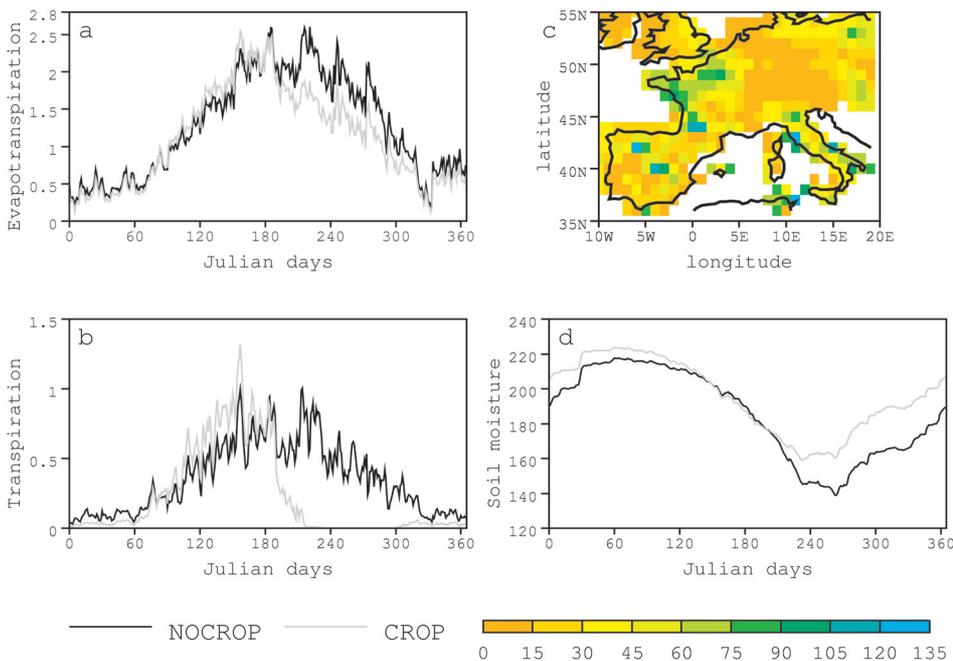
The seasonal evolution of evapotranspiration (ETR), as displayed in Figure 6a for both CROP and NOCROP simulations,

does not parallel the behaviour of leaf area index (Fig. 5c). ETR values are indeed quite similar in both versions from November to June. The soil is not depleted in moisture during that period since it has replenished during winter and the water demand is not very great in spring. The ETR is therefore quite close to the potential rate. Moreover, the change in canopy resistance with increased LAI, when comparing both model versions, is small and results in a slight increase in ETR in CROP.

However, from early July until the end of October, the ETR rates simulated in NOCROP are larger than those simulated in CROP, reflecting the presence of leaves in NOCROP, in areas covered with winter wheat, while bare soil is the only potential source of evaporation in CROP (Fig. 6b). The annually cumulated difference of ETR between the standard and the improved version of our code (still averaged over Europe) amounts to  $42 \text{ kg of water per m}^2$  of soil, of which  $41 \text{ kg}/\text{m}^2$  arise from the four months of obvious discrepancy (July to October). Integrated over our European domain,  $1.64 \times 10^{11} \text{ m}^3$  of water are lost in one year for the atmosphere, i.e. about 1% of its maximum storage value (which is  $13 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{year}$  according to estimates from Perrier et al. [29]).



**Figure 5.** Time evolution of the simulated and observed (from MODIS satellite) leaf area index. (a) for C3 crops; (b) for C4 crops; (c) mean LAI over Europe, combining all PFTs (natural and crops). NOCROP is plotted using the black line, and CROP using the grey line.



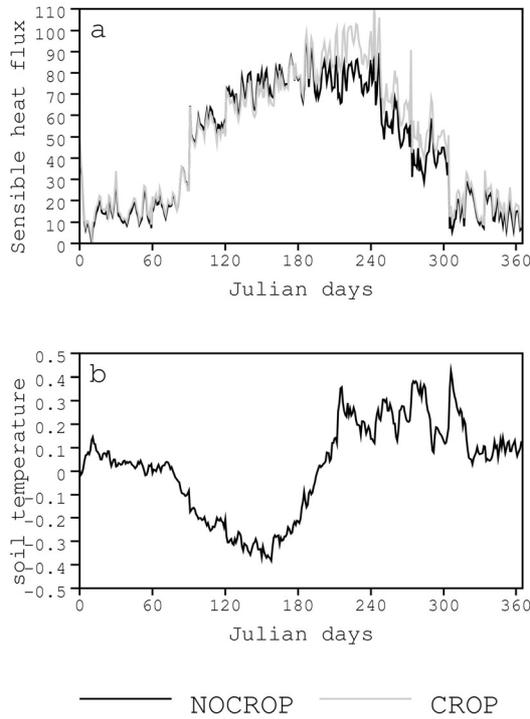
**Figure 6.** Simulated water budget over Europe. (a) simulated time evolution of mean evapotranspiration (mm/day). (b) simulated time evolution of mean transpiration of C3 crops (mm/day). (c) Mean difference (CROP – NOCROP) in total soil moisture (mm) at the end of the growing time (averaged between mid-September and mid-October). (d) simulated time evolution of mean total soil moisture over Europe (mm). For time evolutions, NOCROP is plotted using the black line, and CROP using the grey line.

These results imply that more accurate representation of crop phenology leads to a smaller loss of water to the atmosphere, which therefore should dry out in the absence of feedbacks. The soil, on the other hand, remains wetter when crops are more realistically simulated. Differences are largest at the end of September (Fig. 6c-d) once the cropping season has stopped and right before the start of the next season. The areas where storage of water is the largest in CROP are those where the proportion of C3 cover is also the largest (not shown). At the end of May, on the other hand, although winter wheat has already been quite productive in CROP, the soil remains quite (and similarly) wet in both versions (Fig. 6d).

The large seasonal and annual changes in ETR that are described above are partly compensated by changes in sensible heat which slightly increases from July until October in CROP (Fig. 7a) and by the warming of the land surface (Fig. 7b), resulting in more thermal loss.

#### 4.4. Carbon budget

Both CROP and NOCROP simulations assume equilibrium of all carbon reservoirs, and therefore the net annual NEE is zero. Nevertheless, we observe in Figures 8a–c that when crops are included in the model, the seasonality of photosynthesis

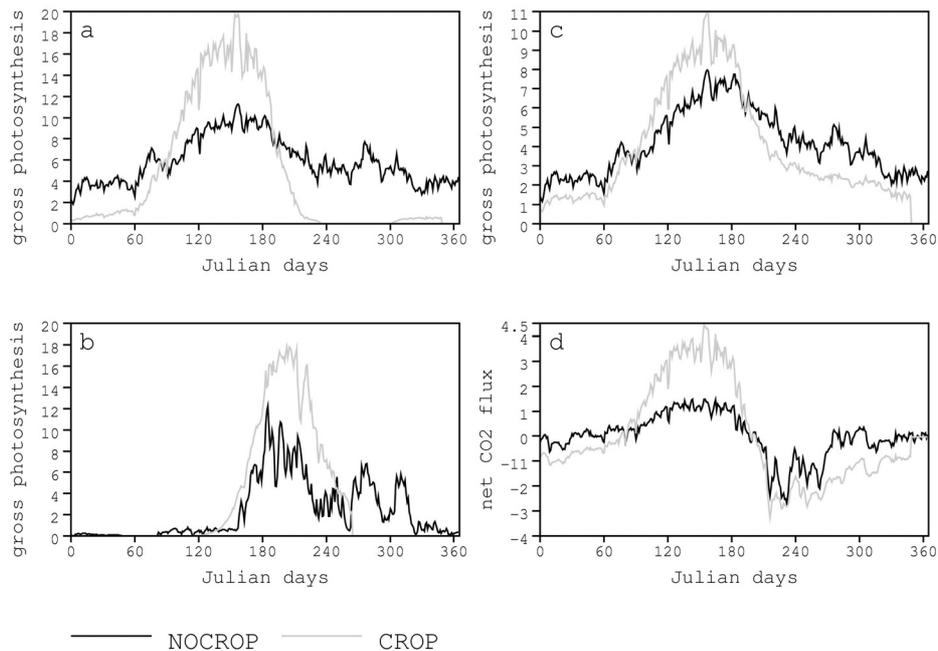


**Figure 7.** Time evolution of the simulated (a) sensible heat flux ( $W/m^2$ ), averaged over Europe. NOCROP is plotted using the dark line, and CROP using the grey line. (b) difference in surface soil temperature between CROP and NOCROP, averaged over Europe. Negative values indicate colder temperature when crops are more adequately simulated.

(GPP) is enhanced, resulting in an increase in the seasonal peak-to-peak amplitude of GPP by  $\sim 60\%$  compared with NOCROP (respective maximum GPP values are  $11 \text{ gC}/m^2/\text{year}$  in CROP and  $7.9 \text{ gC}/m^2/\text{year}$  in NOCROP). Parallel to the simulated LAI seasonality, GPP remains close to zero prior to the start of plant growth (day 60) and after harvest (day 200), unlike in NOCROP where crops behave like grasslands, growing all year round.

The seasonal cycle of NEE is also enhanced (Fig. 10d), and primarily reflects the GPP increase in Figure 10c. The NEE enhancement quantified by the difference between CROP and NOCROP cumulated between day 60 and day 190 amounts to  $171 \text{ gC}/m^2$  (NEE in CROP is  $\sim 5.5$  times higher than in NOCROP), compared with  $175 \text{ gC}/m^2$  ( $\sim 25\%$  of the NOCROP value) for the GPP enhancement. This shows that GPP, rather than respiration, controls NEE during the crop-growing season. This corroborates the results obtained at the North American flux sites. Note that global inversion studies using atmospheric  $CO_2$  concentration measurements to infer the large-scale distribution of sources and sinks of  $CO_2$  all calculate an increased seasonality of NEE in Europe when compared with the first guess fluxes where crops are not accounted (Rivier pers. Comm.). This indirectly corroborates the increased seasonality of NEE over Europe found in the CROP run, although inversions remain too coarse to separate crops and forests within Europe.

Interestingly, in the two months following the harvest of the C3 crops (day 190-day 310), NEE in the CROP run is a larger source to the atmosphere compared with the NOCROP run. This is because larger amounts of assimilates formed during the growing season are laid off to the ground where they decompose rapidly.



**Figure 8.** Time evolution of simulated components of the carbon cycle, expressed in  $gC/m^2$  and averaged over Europe. (a) Mean gross primary production (GPP) of C3 crops. (b) Mean GPP of C4 crops. (c) European GPP (cumulated over all PFTs). (d) European net ecosystem productivity (cumulated over all PFTs). NOCROP is plotted using the dark line, and CROP using the grey line.

The equilibrium soil carbon stocks are smaller in CROP (108 t/ha) than in NOCROP (152 t/ha) due to the export of harvested biomass in ORCHIDEE-STICS (see simulation S3 in Tab. Ia). To study the behaviour of croplands as carbon net annual sinks or sources, we would need to run longer simulations with changing management, CO<sub>2</sub> and climate. The only comment we can make here is that carbon uptake by croplands occurs during a shorter time period and is more efficient in the CROP run.

## 5. CONCLUSION

We modified a global and dynamic vegetation model named ORCHIDEE to account for croplands better, using knowledge from the STICS crop model. Specific outputs from STICS describing the phenological state of agro-ecosystems are prescribed in ORCHIDEE which then recomputes the carbon, water and energy fluxes.

Application of ORCHIDEE-STICS over Western Europe shows that accounting for crops in that manner results in a much shorter growing season, leading to a drier atmosphere, wetter soils, and warmer soil temperatures in autumn with more sensible heat emitted to the atmosphere. The seasonal cycle of NEE is increased as reflecting enhanced photosynthesis during the crop-growing season, and results altogether in a shorter but more efficient period for carbon uptake.

Implications of these changes on the European climate and on atmospheric CO<sub>2</sub> composition needs to be (and will be) studied using a general circulation model of the atmosphere coupled to a land-surface scheme. ORCHIDEE is already coupled to the LMDz atmospheric model developed at IPSL and is therefore an adequate candidate for further testing.

**Acknowledgements:** This work was carried out at the Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Saclay, France). The computer time and the computing facilities were provided by the Commissariat à l'Énergie Atomique. Most drawings were performed using VCDAT, the software developed at PCMDI.

## REFERENCES

- [1] Betts R.A., Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature and radiative forcing, *Atmos. Sci. Lett.* (2001).
- [2] Botta A., Viovy N., Ciais P., Friedlingstein P., Monfray P., A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data, *Global Change Biol.* 15 (1999) 709–725.
- [3] Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Richard D., STICS a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterisation applied to wheat and maize, *Agronomie* 18 (1998) 311–346.
- [4] Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoulaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Model validation for wheat and maize, *Agronomie* 22 (2002) 69–93.
- [5] Brovkin V., Ganopolski A., Claussen M., Kubatzki C., Petoukhov V., Modelling climate response to historical land cover change, *Global Ecol. Biogeogr. Lett.* 8 (1999) 509–517.
- [6] Chase T.N., Pielke R.A., Kittel T.G.F., Nemani R.R., Running S.W., Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter, *Clim. Dynam.* 16 (2000) 93–105.
- [7] Claussen M., Gayler V., The greening of the Sahara during the mid-Holocene: results of an interactive atmosphere-biome model, *Global Ecol. Biogeogr. Lett.* 6 (1997) 369–377.
- [8] Copeland J.H., Pielke R.A., Kittel T.G.F., Potential impacts of vegetation change: a regional modeling study, *J. Geophys. Res.* 101 (1996) 7409–7418.
- [9] de Noblet N., Claussen M., Prentice C.I., Mid-Holocene greening of the Sahara: first results of the GAIM 6000 year BP experiment with two asynchronously coupled atmosphere/biome models, *Clim. Dynam.* 16 (2000) 643–659.
- [10] de Noblet N., Prentice C.I., Joussaume S., Texier D., Botta A., Haxeltine A., Possible role of atmosphere-biosphere interactions in triggering the last glaciation, *Geophys. Res. Lett.* 23 (1996) 3191–3194.
- [11] de Rosnay P., Polcher J., Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2 (1998) 239–255.
- [12] Ducoudré N., Laval K., Perrier A., SECHIBA a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land/atmosphere interfaces within the LMD atmospheric general circulation model, *J. Clim.* 6 (1993).
- [13] Eastman J.L., Coughenour M.B., Sr. R.A.P., Does grazing affect regional climate? *J. Hydrometeorol.* 2 (2001) 243–253.
- [14] Falge E., Baldocchi D., Olson R., Anthoni P., Aubinet M., Clement R., Granier A., Bernhofer C., Hollinger D., Ta Lai C., Kowalsky A., Meyers M., Moors E.J., Munger W., Pilegaard K., Rannik U., Rebmann C., Verma S., others a., Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange, *Agric. For. Meteorol.* 170 (2000) 71–77.
- [15] Friedlingstein P., Joel G., Field C.B., Fung I., Toward an allocation scheme for global -terrestrial carbon model, *Global Change Biol.* 5 (1998).
- [16] Gallimore R.G., Kutzbach J.E., Role of orbitally induced changes in tundra area in the onset of glaciation, *Nature* 381 (1996) 503–505.
- [17] Gedney N., Valdes P., The effect of Amazonian deforestation on northern hemisphere circulation and climate, *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000) 3053–3056.
- [18] Gervois S., de Noblet-Ducoudré N., Viovy N., Ciais P., Brisson N., Seguin B., Perrier A., Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites, *Earth Interact.* (in press).
- [19] Govindasamy B., Duffy P.B., Caldeira K., Land Use changes and Northern Hemisphere cooling, *Geophys. Res. Lett.* 28 (2001) 291–294.
- [20] Heck P., Lüthi D., Wernli H., Schär C., Climate impacts of European-scale anthropogenic vegetation changes: a sensitivity study using a regional climate model, *J. Geophys. Res.* 106 (2001) 7817–7835.
- [21] IPCC: Climate Change 2001, The Scientific Basis, Cambridge University Press, 2001.
- [22] Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P., Smith P., Nabuurs G.-F., Folberth G., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E.-D., Valentini R., Dolman A.J., Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions, *Science* 300 (2002) 1538–1542.
- [23] Joussaume S., Taylor K., Braconnot P., Mitchell J., Kutzbach J.E., Harrison S.P., Prentice C.I., Abe-Ouchi A., Bonfils C., Broccoli A., Dong B., Herterich K., Hewitt C., Jolly D., Kim J.W., Kislov

- A., Kitoh A., Masson V., McAvaney B.J., McFarlane N., de Noblet N., Peterschmitt J.-Y., Pollard D., Rind D., Royer J.-F., Schlesinger M., Syktus J., Thompson S., Valdes P., Vettoretti G., Webb R.S., Wyputta U., Monsoon changes/Regional climates for 6000 years ago: results of 18 simulations from the Palaeoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP), *Geophys. Res. Lett.* 26 (1999) 859–862.
- [24] Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudré N., Ogée J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Polcher J., Prentice I.C., A dynamical global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cycles* (submitted).
- [25] Kutzbach J.E., Bonan G.B., Foley J.A., Harrison S.P., Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene, *Nature* 384 (1996) 623–626.
- [26] Matthews E., Weaver A.J., Eby M., Meissner K.J., Radiative forcing of climate by historical land cover change, *Geophys. Res. Lett.* 30 (2003) 1055, doi:10.1029/2002GL016098.
- [27] Mucher C.A., Steinnocher K., Champeaux J.L., Griguolo S., Wester K., Loudjani P., in 18th EARSEL Symposium on Operational Remote Sensing for Sustainable development, Enschede, ITC, 11–13th May 1998, pp. 107–113.
- [28] Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J.T., Votava P., Nemani R.R., Running S.W., Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data, *Remote Sens. Environ.* 83 (2002) 214–231.
- [29] Perrier A., Tuzet A., L'eau dans la biosphère, in: Tiercelin J.-R. (Ed.), *Traité de l'irrigation Vol. Lavoisier*, 1998, pp. 7–43.
- [30] Pielke R.A., Marland G., Betts R.A., Chase T.N., Eastman J.L., Niles J.O., Niyogi D.D.S., Running S.W., The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases, *Philos. T. Roy. Soc. A.* 360 (2002) 1705–1719.
- [31] Polcher J., Laval K., A statistical study of the regional impact of deforestation on climate in the LMD GCM, *Clim. Dynam.* 10 (1994) 205–229.
- [32] Shukla J., Nobre C., Sellers P.J., Amazonian deforestation and climate change, *Science* 247 (1990) 1322–1325.
- [33] Sitch S., Smith B., Prentice C.I., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M., Thonicke K., Venevski S., Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model, *Global Change Biol.* 9 (2003) 161–185.
- [34] Smith P., Milne R., Powlson D.S., Smith J.U., Falloon P.D., Coleman K., Revised estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land, *Soil Use Manage.* 16 (2000) 293–295.
- [35] Texier D., de Noblet N., Harrison S.P., Haxeltine A., Joussaume S., Jolly D., Laarif F., Prentice I.C., Tarasov P., Quantifying the role of biosphere-atmosphere feedbacks in climate change: a coupled model simulation for 6000 yr BP and comparison with palaeodata for northern Eurasia and northern Africa, *Clim. Dynam.* 13 (1997) 865–882.
- [36] The-IMAGE-Project: Global Change Scenarios of the 21st Century, Elsevier Science Ltd, Oxford, 1998.
- [37] Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J., Melillo J.M., Human domination of Earth's ecosystems, *Science* 277 (1997) 494–499.
- [38] Vleeshouwers L.M., Verhagen A., Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe, *Global Change Biol.* 8 (2002) 519–530.
- [39] Zhang H., Henderson-Sellers A., Mc Guffie K., Impacts of tropical deforestation. Part I: process analysis of local climatic change, *J. Clim.* 9 (1996) 1497–1517.

## Annexe C - Procédure d'exécution de simulations avec ORCHIDEE et STICS

### 1. Simulations avec ORCHIDEE

La figure 1 montre la procédure à suivre et les forçages nécessaires afin de réaliser une simulation avec ORCHIDEE. La première étape consiste à préparer le jeu des variables de forçage, la seconde est l'initialisation du modèle.

#### *a) Conditions aux limites et forçage*

Pour chaque maille, nous devons renseigner les conditions aux limites (figure 1) :

- Le type de sol, c'est-à-dire les parts respectives (en %) en argile, limon et sable pour chaque maille d'après la carte globale de Zobler (1986) à la résolution spatiale du degré ;
- La couverture végétale : pour toutes les simulations effectuées dans le cadre de la thèse, nous avons désactivé le calcul dynamique de la végétation, le type de PFT est prescrit. Pour les simulations sur sites agricoles (chapitre 3), nous avons prescrit 100 % de la couverture végétale sous forme de blé (C<sub>3</sub>) ou bien de maïs (C<sub>4</sub>) suivant le cas. Pour les simulations à l'échelle de l'Europe, nous avons utilisé la carte de végétation CORINE (EEA, 1995), compilée à partir de données satellitaires, et donné pour chaque maille de résolution 10' \* 10', la part de la superficie occupée par chacun des PFT. Cette carte sera présentée au chapitre 4.

Les variables de forçage sont essentiellement climatiques, au pas de temps horaire (ou semi-horaire suivant la disponibilité du forçage). Si ces données ne sont pas disponibles, on utilise un générateur de temps qui, à partir des données mensuelles, reconstitue la variabilité interjournalière ainsi que le cycle diurne. Le générateur de temps ne sera pas utilisé dans cette étude.

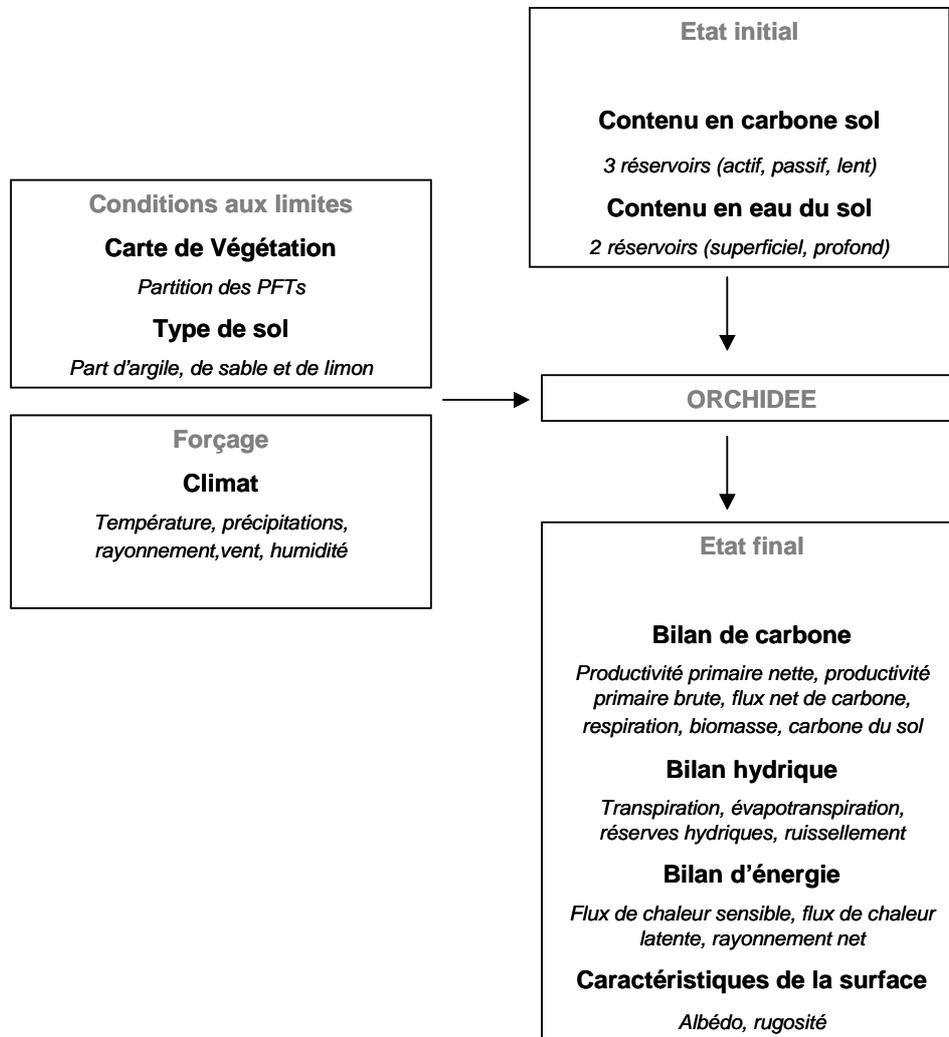


Figure 1 : Principe de réalisation de simulations avec ORCHIDEE

### b) Initialisation

Au premier pas de temps, le contenu en eau du sol est maximal (300 mm) et les réservoirs de carbone sont vides. Au cours de la première année de simulation, les réservoirs vont donc se vider plus ou moins suivant le bilan entre précipitation et évapotranspiration. L'indice foliaire et la biomasse dépendent étroitement du contenu en eau *via* le stress hydrique. On conçoit aisément que toutes ces variables ne soient en équilibre que si le réservoir est lui-

même en équilibre. C'est pourquoi il convient de faire tourner le modèle suffisamment longtemps pour équilibrer le contenu en eau et en carbone du sol avec les variables de forçage (climat, type de sol et carte de végétation). Plus précisément, la procédure se réalise en trois étapes (fig. 2) :

- On fait tout d'abord tourner SECHIBA et STOMATE de manière couplée et synchrone pendant dix ans de manière à calculer un état stationnaire pour les variables pronostiques « rapides » (réserves hydriques du sol, GPP et LAI).
- En partant de l'état stationnaire (1) ainsi obtenu, on équilibre les autres variables du bilan de carbone de STOMATE par une simulation couplée asynchrone SECHIBA-STOMATE d'une durée de deux cents ans. Pour économiser le temps de calcul, STOMATE (pas de temps journalier) n'est couplé à SECHIBA (pas de temps inférieur à l'heure) que durant une année toutes les cinquante années de simulation. Les autres années, STOMATE est utilisé seul.
- En partant de l'état stationnaire (2), une simulation longue d'environ dix mille ans est nécessaire pour équilibrer les réservoirs de carbone, en particulier le réservoir passif. Pour des raisons évidentes de temps de calcul, on fait tourner uniquement la partie carbone du sol (pas de temps mensuel).
- L'état stationnaire (3) ainsi obtenu servira de point de départ à chaque simulation présentée dans cette étude. Pour les simulations à l'échelle d'un site, un nouvel état d'équilibre propre à chaque site doit être constitué.

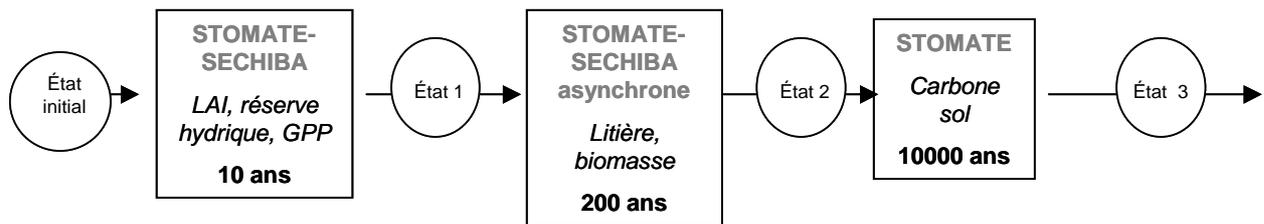


Figure 2 : Procédure d'initialisation d'ORCHIDEE

## 2. Mode opératoire de simulations avec STICS

### *a) Conditions aux limites et forçage*

Les conditions aux limites de STICS sont de deux types :

- Les caractéristiques du sol : sa texture, sa densité apparente, sa capacité de rétention en eau, la présence d'horizons différents, la présence éventuelle d'obstacles (roche mère, nappe d'eau).
- L'espèce et la variété cultivée.

Les variables de forçage sont :

- Les variables climatiques journalières : les températures minima et maxima, les précipitations, le rayonnement, la vitesse du vent et l'humidité de l'air.
- Les pratiques agricoles : date et profondeur de semis, calendrier d'irrigation, de fertilisants, et de labour, profondeur du labour. Si les données ne sont pas disponibles, STICS calcule un calendrier optimal d'irrigation et de fertilisation.

### *b) Initialisation*

Pour l'initialisation de STICS, tous les modules fonctionnent au pas de temps journalier. Une durée de simulation de cinq ans est suffisante pour équilibrer les contenus d'azote et d'eau du sol. Dans STICS, il y a deux réservoirs d'azote. La constante de temps du premier est inférieure à l'année ; il s'équilibre en cinq ans. Le deuxième réservoir, beaucoup plus lent, est stable à l'échelle de la décennie ; son contenu est prescrit en début de simulation, à  $80 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  (fig. 3).

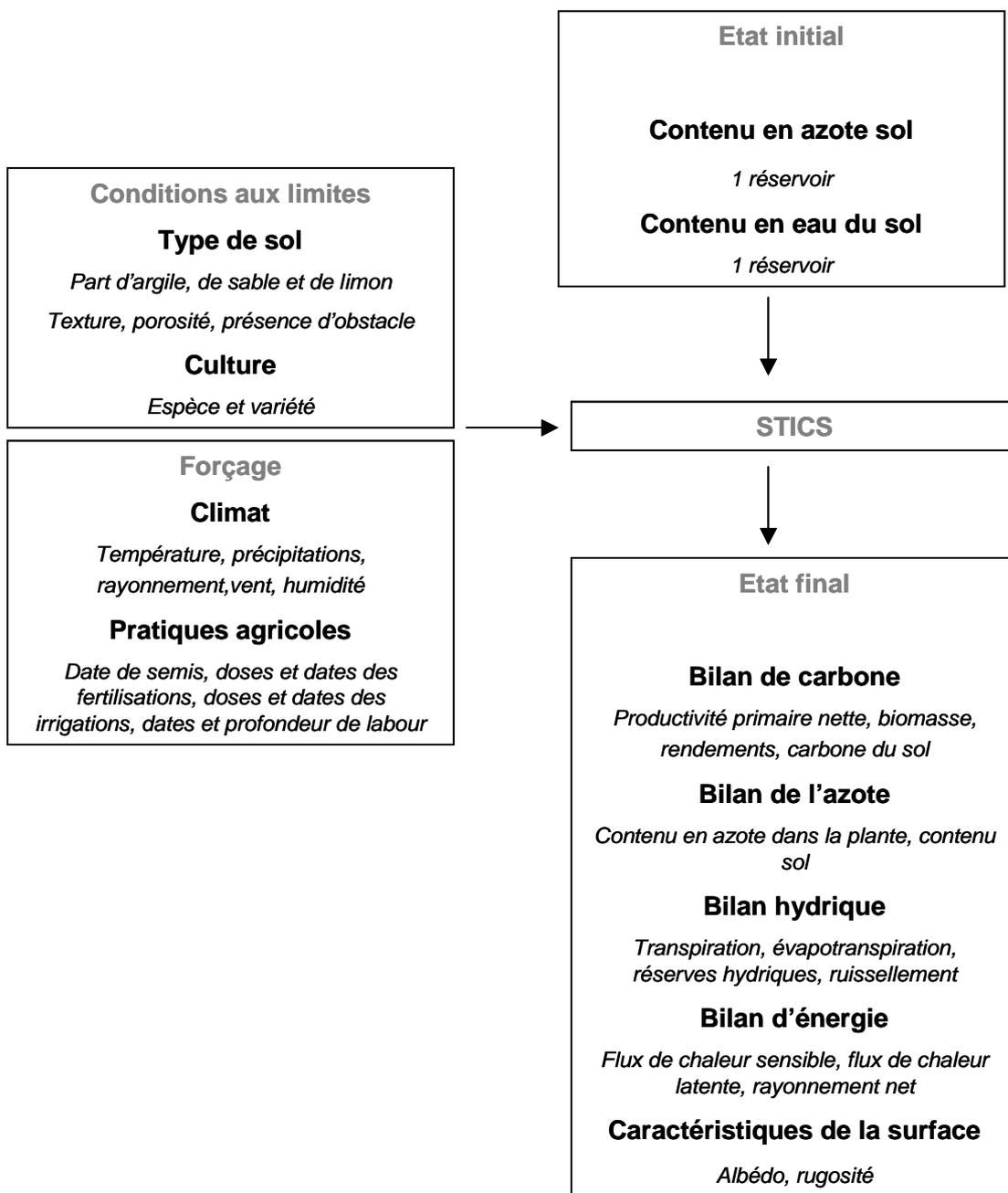


Figure 3 Principe de réalisation de simulations avec STICS



## Bibliographie.

---

Abler D.G., Shortle J.S. 2000 Climate change and agriculture in the Mid – Atlantic region. *Clim. Res.*, 14, 185 - 194.

Abrol Y.P., Ingram K.T. 1995 Les effets de la hausse des températures diurnes et nocturnes sur la croissance et les rendements de certaines plantes cultivées *inclus dans* « Changement du climat et production agricole ». éd. *FAO*, 143 - 164.

Alcamo J., Leemans R., Kreilman E. 1998 Global change scenarios of the 21<sup>st</sup> century. Results from the IMAGE 2.1 Model. *Pergamon Press*.

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. 2002 Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? *Expertise scientifique collective INRA* 332p.

Auriac F., Rey. V. 1998 Atlas de France "L'espace rural". *Coll. La documentation française. éd. Reclus* 128p.

Bazzaz F., Sombroek W. 1995 Changement du climat et production agricole. éd. *FAO* 406p.

Bertin N. 1995 Competition for assimilates and fruit position affect fruit set in indeterminate greenhouse tomato. *Annals of Botany*, 75, 55-65.

Betts R.A. 2001 Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature and radiative forcing. *Atmos. Sci. Lett.*, 1023 - 1038.

Betts R.A. 1999 The impact of land-use on the climate of present day. In Ritchie (editor) Research activities in atmospheric and oceanic modelling. *CAS /JSCE WGNE report n°28*.

Bonan G.B. 2002a Ecological climatology : concepts and applications. ed. *Cambridge University Press* 678p.

Bonan G.B., Levis S., Kergoat L., Olesen K.W. 2002b Landscape as patches of plant functional types : an integrating concept for climate and ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(2), 178-191.

Bonan G.B. 2001 Observational evidence for reduction of daily maximum temperature by croplands in the Midwest United States. *J. of Climate*, 14, 2430-2442.

Bonan G.B. 1999 Frost followed the plow: Impacts of deforestation on the climate of the United States. *Ecol. Appl.*, 9, 1305-1315.

Botta A., Viovy N., Ciais P., Friedlingstein P., Monfray P. 2000 A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology*, 15, 709 - 725.

Botta A. 1999 Modélisation globale de la phénologie de la biosphère continentale à partir des données satellitaires. *Thèse de doctorat Université Paris VI* 150p.

Boulaine J. 1996 Histoire de l'agronomie en France. 2<sup>ème</sup> éd. *Coll. Tech-doc, éd. Lavoisier*, 448p.

Bousquet P., Peylin P., Ciais P., Le Quéré C., Friedlingstein P., Tans P. 2000 Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 290, 1342-1348.

Bradbury N.J., Whitmore A.P., Hart P.B.S., Jenkinson D.S. 1993 Modelling the fate of N in crop and soil in the year following application of <sup>15</sup>N labelled fertilizer to winter wheat. *J. Agric. Sci. Camb.*, 121, 363-379.

Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Ziner D., Sierra J., Beruzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudill re J.P., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. 2002a An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309 - 332.

Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D, Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E 2002b STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69-93.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Del colle R. 1998a STICS a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and maize. *Agronomie*, 18, 311-346.

Brisson N. 1998b An analytical solution for the estimation of the critical soil water balance under growing crops. *Hydrology and Earth System Science*, 2, 221-231.

Brisson N., Itier B., L'Hotel J.C., Lorendeau J.Y. 1998c Parametrisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models. *Ecological modelling*, 107, 159-169.

Brisson N., Dorel M., Ozier-Lafontaine H. 1998d Effect of soil management and water regime on the banana growth between planting and flowering. Simulation using the STICS model. *Acta-Hort.*, 490, 229-238.

Brisson N., Perrier A. 1991 A semi-empirical model of bare soil for crop simulation models. *Water Resource Research*, 27, 719-727.

Brovkin V., Ganopolski A., Claussen M., Kubatzki C., Petoukhov V. 1999 Modelling climate response to historical land cover change. *Glob. Ecol. and Biogeog.*, 8, 509-517.

Bryan K. 1969 A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *Journal of Computational Physics*, 4, 347-376.

Burgadonsky et al. 1998 *J. of Ecol.*, 16, 321-329.

Calvet J.C., Noilhan J., Roujean J.L., Bessemoulin P., Cabelguenne M., Olioso A., Wigneron J.P. 1998 An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agric. Forest Meteorol.*, 92, 73-95.

Chase T.N., Pielke Sr R.A., Kittel T.G.F., Nemani R.R., Running S.W. 2000 Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Clim. Dyn.*, 16, 93-105.

Childs S.W., Gilley J.R., Splinter W.E. 1977 A simplified model of corn growth under moisture stress. *Trans ASEA*, 20(5), 858-865.

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

Clapp C.E., Allmaras R.R., Layese M.F., Linden D.R. 1997 Soil organic carbon and <sup>13</sup>C abundance as related to tillage, crop residue, and nitrogen fertilisation under continuous corn management in Minnesota. *Soil and Tillage Research*, 55, 127-142.

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, 369-377.

Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klir J., Körschens M., Poulon P.R., Richer D.D. 1997 Simulating trends in soil organic carbon in long term experiments using RothC 26.3. *Geoderma*, 81, 29-44.

Collatz G.J., Ribas-Carbo M., Berry J.A. 1992 Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C<sub>4</sub> plants. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 19, 519-538.

Copeland J. H., Pielke R. A., Kittel T.G.F. 1996 Potential impacts of vegetation change: a regional modelling study. *J. Geoph. Res.*, 101 (D3), 7409-7418.

Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall C.D., Totterdell I.J. 2000 Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 750-756.

Delécolle R., Jayet P.A., Soussana J.F. 2000 Agriculture et réchauffement climatique : quelques éléments de réflexion. *Ed. Le jaune et rouge*, 555, 34-39.

Dickinson R., Henderson-Sellers A., Kennedy P., Wilson M. 1986 Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR CCM. *NCAR/TN-275-STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder (Colorado)*.

Doll P., Siebert S. 2001 Global modelling of irrigation water requirements. *Water resources research*, 8, 176-198.

Domergue M. 2001 Impact du réchauffement climatique sur le parcours phénologique d'espèces et de variétés fruitières dans la vallée du Rhône. *Mémoire de 3<sup>ème</sup> année ESIPTA*, 56p.

Duby G., Wallon A. 1977 Histoire de la France rurale. *éd. Bibliothèque nationale de France*, 4 tomes.

Ducoudré N., Laval K., Perrier A. 1993 SECHIBA a new set of parametrizations of the hydrologic exchanges at the land/atmosphere interfaces within the LMD atmospheric general circulation model. *J. of Climate*, 6, 248-273.

Dufresne J.-L., Friedlingstein P., Berthelot L., Bopp L., Ciais P., Fairhead L., LeTreut H., Monfray P. 2002 Direct and indirect effects of future climate change on land and ocean carbon uptake. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), doi :10.1029/2001GL013777.

Eastman J.L., Coughenour M.B., Pielke S.R.A. 2001 Does grazing affect regional climate? *J. Hydrometeorol.*, 2, 243-253.

EC 2002 Agricultural situation in the candidate countries : Country Report on Hungary. *Ed. European Commission* 63p.

EEA 1995 CORINE Land cover. *Report of the European Environment Agency*, 163p.

Esser G., Leith T. 1989 Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts. *Tellus*, 39B, 245-260.

Falge E., Baldocchi D., Olson R., Anthoni P., Aubinet M., Clement R., Granier A., Bernhofer C., Hollinger D., Ta Lai C., Kowalsky A., Meyers M., Moors E.J., Munger W., Pilegaard K., Rannik U., Rebmann C., Verma S., and others 2000 Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agr. For. Met.*, 170, 71-77.

FAO 2002 FAOSTAT : Food and Agricultural Organisation statistical databases. [CD-ROM], Rome.

FAO 2000 Incidence des politiques céréalières nationales de certains pays sur les disponibilités et les prix des céréales dans le monde. *Ed. Lavoisier* 54p.

Farquhar G.D., Von Caemmerer S., Berry J.-A. 1980 A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, 149, 78-90.

Foley J.A., Prentice I.C., 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 Biogeochem. Cycles*, 10, 603-628.

Friedlingstein P., Dufresne J.-L., Cox P.M., Rayner P. 2003 How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle ? *Tellus*, 55B, 692-700.

Friedlingstein P., Joel G., Field C.B., Fung Y. 1998 Toward an allocation scheme for global - terrestrial carbon model. *Global Change Biology*, 5, 755-770.

Friedlingstein, P., Fung I.Y., Holland E.A., John J.G., Brasseur G.P., Erickson D.J., Schimel D.S. 1995 On the contribution of the biospheric CO<sub>2</sub> fertilization to the missing sink. *Global Biogeochem. Cycles*, 9, 541-556.

Gallimore R.G., Kutzbach J.E. 1996 Role of orbitally induced changes in tundra area in the onset of glaciation. *Nature*, 381, 503-505.

Gate P. 1996 Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. *ITCF & Lavoisier (eds)*, 429p.

Gabrielle B., Mary B., Roche R., Smith P., Gosse G. 2002 Simulation of carbon and nitrogen dynamics in arable soils : a comparison of approaches. *European J. of Agronomy*, 6, 236-247.

Gabrielle B., Menasser S., Houot S. 1995 Analysis and field evaluation of the CERES models water balance component. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 1403-1412.

Gedney N., Valdes P. 2000 The effect of Amazonian deforestation on northern hemisphere circulation and climate. *Geoph. Res. Let.*, 27(19), 3053-3056.

Gervois S., de Noblet-Ducoudré N., Viovy N., Ciais P., Brisson N., Seguin B., Perrier A. Including croplands in a global biosphere model : methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interactions* (sous presse).

- Gervois S., Viovy N., De Noblet – Ducoudré N., Ciais P., Brisson N., Seguin B., Perrier A. 2002 Vers une meilleure prise en compte des surfaces cultivées dans un modèle global de biosphère (ORCHIDEE) : Couplage avec un modèle agronomique (STICS). *Note scientifique de l'IPSL*, 24, 37p.
- Gitz V., Ciais P. 2003 Amplifying effects of land-use change on future atmospheric CO<sub>2</sub> levels *Global Change Biology*, 5, 323-345.
- Glendining M.J., Powlson D.S., Poulton P.R., Bradbury N.J., Palazzo D., Li, X. 1996 The effects of long-term applications of inorganic nitrogen fertilizer in the Broadbalk wheat experiment. *J. Agric. Sci.*, 127, 347-363.
- Godwin D.C., Jones C.A. 1991 N dynamics in soil-plant systems. *In: Hanks J., Ritchie J.T. (Eds.), Modeling Plant and Soil Systems, Agronomy Monograph*, 31, ASA-Madison, 287-321.
- Gondé R., Jussiaux M. 1980 Cours d'agriculture moderne. éd. *La maison rustique*, 619p.
- Govindasamy B., Duffy P. B., Caldeira K. 2001 Land use changes and northern hemisphere cooling. *Geoph. Res. Letters*, 28 (2), 291-294.
- Gower, S.T., Kucharik C.J., Norman J.M. 1999 Direct and indirect estimation of leaf area index,  $f_{APAR}$ , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70, 29-51.
- Gregory P.J., Palta J.A., Batts G.R. 1997 Root systems and root mass ratio - carbon allocation under current and projected atmospheric conditions in arable crops. *Plant and Soil*, 187, 221-228.
- Hansen S., Jensen H.E., Nielsen N.E., Swenden H. 1990 DAISY, a soil-plant system model. Danish simulation model for transformation and transport of energy and matter in the soil plant atmosphere system. *The national agency for environmental protection, Copenhagen*, 369p.
- Heck P., Lüthi D., Wernli H., Schär C. 2001 Climate impacts of European-scale anthropogenic vegetation changes: a sensitivity study using a regional climate model. *J. Geoph. Res.*, 106, 7817-7835.
- Heller R., Esnault R., Lance C. 1998 Physiologie végétale, tome 1 : Nutrition. 6<sup>ème</sup> éd. de l'abrégé, éd. *Dunot*, 323p.
- Henderson-Sellers A., McGuffie K., Pitman A. 1998 The project for intercomparison and land-surface schemes 1992 – 1995. *Clim. Dyn.*, 12, 849-859.
- Houghton R.A., Hackler J.L., Lawrence K.T. 1999 The US carbon budget. *Science*, 285, 574-578.

- House J.I., Prentice I.C., Le Quéré C. 2002 Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 8, 1047-1052.
- Hulme M. 1994 Validation of large scale fields in General Circulation Models. In *Global Precipitations*, Desbois M. (éd.) NATO ASI Series, 387-406.
- IFEN 2002 L'environnement en France. éd. *La découverte*, 606p.
- IIA 1960 Annuaire international de statistique agricole : années 1903 – 1959. éd. *Institut International d'Agriculture*. 73p.
- IPCC 2001 Climate Change: The scientific basis. *Cambridge University Press*, 598p.
- ITCF 2001 Diagnostic des accidents du blé tendre. éd. *ITCF Céréaliéristes de France* 159p.
- Jancovici J.M. 2002 L'avenir climatique : quel temps ferons-nous ? *Coll. Science ouverte*, 242p.
- Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P., Smith P., Nabuurs G.-F., Folberth G., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E.-D., Valentini R., Dolman A.J. 2003 Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science*, 300, 1538-1542.
- Johnson A.E. 1972 The effects of ley and arable cropping system on the amount of soil organic matter in the Rothasmed and woburn ley-arable experiments II<sup>nd</sup> part.
- Jones C.A., Kiniry J.R., 1986 CERES maize, a simulation model of maize crops and development. *Texas A&M University Press, College station, tome X*, 243p.
- Juin S. 2001 Impact du réchauffement climatique sur la répartition géographique et les calendriers de production de trois systèmes fourragers. *Mémoire DAA, ENSA Montpellier* 35p.
- Keeling C.D., Chin J.F., Whorf T.P. 1996 Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements. *Nature*, 382, 146-149.
- Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudré N., Ogée J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Polcher J., Prentice C. A dynamic global vegetation model for studies of a coupled atmosphere-biosphere system. *Glob. Biogeochem. Cycles* (soumis).
- Kucharik C.J., Brye K.R. 2003 Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. *J. Environ. Qual.*, 32, 247-267.
- Kucharik C.J., Foley J., Delire C., Fisher A. V., Coe M.T., Lenters J.D., Young-Molling C., Ramankutty N. 2001 Testing the performance of a dynamic : water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Glob. Biogeo. Cyc.*, 14(3), 795-825.

Lafolie F. 1991 The PASTIS model. *Fertilizer Research*, 27, 215-231.

Leff B., Ramankutty N., Foley J.A. 2004 Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1009, doi:10.1029/2003GB002108.

Le Roy-Ladurie E. 1994 Paysages, paysans L'art de la terre en Europe du Moyen Age au XX<sup>ème</sup> siècle. *Bibliothèque nationale de France* 287p.

Magdelaine V. 2002 Le blé tendre : marchés, débouchés, techniques culturales, récolte et conservation. *Ed. La découverte*. 232p.

du Manceau D. 1761 Traité de la culture des terres, suivant les principes de M. Tull. 6 tomes *Paris*, 311p.

Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M. 1999 Calculation of nitrogen mineralisation and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50, 549-566.

Matthews H.D., Weaver A.J., Eby M., and Meissner K.J. 2003 Radiative forcing of climate by historical land cover change. *Geoph. Res. Lett.*, 30(2), 1055-1074.

Mazoyer M. 2002 Larousse agricole : le monde paysan au XXI<sup>ème</sup> siècle. éd. Larousse 768p.

Molina J.A.E., Clapp C.E., Shaffer M.J., Chichester F.W., Larson W.E. 1983 NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformation in soil : description, calibration and behavior. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 85-91.

Monteith J.L. 1977 Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 281, 277-294.

Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang X., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J.T., Votava P., Nemani R.R., Running C.E. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 83, 214-231.

de Noblet-Ducoudré N., Gervois S., Ciais P., Viovy N., Brisson N., Seguin B., Perrier A. Coupling the soil-vegetation-atmosphere-transphert scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie* (sous presse).

de Noblet-Ducoudré N., Claussen M., Prentice I.C. 2000a Mid-Holocene greening of the Sahara : comparing the response of two coupled atmosphere/biome models. *Climate Dynamics*, 16, 643-659.

de Noblet-Ducoudré N. 2000b Impact of land-cover change, as a result of land-use, on the present-day climate and on the simulated mid-Holocene climate change. *AGU 2000, San Francisco (USA), présentation orale.*

de Noblet-Ducoudré N., Prentice I.C., Joussaume S., Texier D., Botta A., Haxeltine A. 1996 Possible role of atmosphere-biosphere interactions in triggering the last glaciation. *Geophysical Research Letters*, 23(22), 3191-3194.

Nobre C., Sellers P.J., Shukla J. 1991 Amazonian deforestation and regional climate change. *J. of Climate* 4, 957-988.

Noilhan J., Planton S. 1989 A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.

Olioso, A., Inoue, Y., Demarty J., Wigneron J.P., Braud I., Ortega-Farias S., Lecharpentier P., Ottlé C., Calvet J.C., Brisson N., 2002 Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, 16-20 September, Valencia (Spain). J.A. Sobrino (Ed.). Publicacions de la Universitat de València (Espanya), 329-338.*

Olioso, A., Inoue, Y., Wigneron, J.P., Ortega-Farias, O., Lecharpentier, P., Pardé, M., Calvet, J.C., Inizan, O., 2001. Using a coupled crop-SVAT model to assess crop canopy processes from remote sensing data. *In IGARSS 2001. July 2001, Sydney (Australia), IEEE Publications. CD Rom : paper 171.pdf, 3p.*

Parton W., Stewart J., Cole C. 1988 Dynamics of C, N, P, and S in grassland soil: a model. *Biogeochemistry*, 5, 109-131.

Peaglar S.M., Fritz S.C., Briks H.J.B. 1989 Vegetation and land use history at Diss Norfolk (UK) *Journal of Ecology*, 77, 203-222.

Pielke S.R.A., Marland G., Betts R.A., Chase T.N., Eastman J.L., Niles J.O., Niyogi D.D.S., Running S. 2002 The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 360, 1705-1719.

Polcher J., Laval K., Dümenil L., Lean J., Rowntree P.R. 1996 Comparing three land surface schemes used in GCMs. *J. of Hydrology*, 18, 373-394.

Polcher J., Laval K. 1994 A statistical study of the regional impact of deforestation on climate in the LMD GCM. *Clim. Dyn.*, 10, 205-229.

Potter C.S., Randerson J.T., Field C.B., Matson P.A., Vitousek P.M., Mooney H.A., Klooster S.A. 1993 Terrestrial ecosystem production : a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem. Cycles*, 7(4), 811-841.

- Porcedu E., Caliandro A. 1990 L'agriculture en région aride. *La Recherche*, 11, 32-34.
- Prentice I.C., Cramer W., Harrison S., Leemans R., Monserud R.A., Solemon A.M. 1992 A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 19, 117-134.
- Prévost P. 1999 Les bases de l'agriculture. éd. Tec & doc, 254p.
- Raich J.W., Rastetter E.B., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Steudler P.A., Peterson B.J., Grace A.L., Moore B., Vorosmarty C. 1991 Potential net primary productivity in South America : Application of a global model. *Ecological Application*, 4, 399-429.
- Ramade F. 1995 Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau : biogéochimie et écologie des eaux continentales et littorales. éd. Ediscience, 786 p.
- Ramankutty N., Foley J. 1999 Estimating historical changes in global land cover ; croplands from 1700 from 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 997-1028
- Ritchie J.T., Omer S. 1984 Description and performance of CERES-Wheat, a user-oriented wheat yield model. *USDA-ARS-SR : Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, tome X*, 159-175.
- Robertson G.P., Paul E.A., Harwood R.R. 2000 Greenhouse gases in intensive agriculture : contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289, 1922-1925.
- de Rosnay P., Polcher J., Laval K., Sabre M. 2002 Modelling experiment of irrigation over Indian Peninsula with ORCHIDEE. *GEWEX news*.
- de Rosnay P., Polcher J. 1998 Modelling roots water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrology and Earth system science*, 2, 239-255.
- Ruimy A., Saugier B., and Dedieu G. 1996 TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity. *Glob. Biochemen. Cycles*, 10, 269-285.
- Ruimy A., Saugier B., and Dedieu G. 1994 Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 99, 5263-5283.
- Saugier B. 1996 Végétation et atmosphère. *Coll. Dominos n°107 éd. Flammarion*, 128p.
- SCEES 2001 L'agriculture, la forêt, et les industries agroalimentaires. *Paris, ministère de l'agriculture et de la pêche. Coll. Graphagri*, 159p.

Schlesinger W.H. 1997 Biogeochemistry : an analysis of global change (2<sup>nd</sup> edition). *San Diego : Academic press.*

Sellers P.J., Dickinson R.E., Randall D.A., Betts A.K., Hall F.G., Berry J.A., Collatz C.J., Denning A.S., Mooney H.A., Nobre C.A. Sato N. 1997 Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between the continents and the atmosphere. *Science*, 275, 502-509.

Sellers P.J. 1986 Simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, 43, 505-531.

Shukla J., Nobre C., Sellers P. 1990 Amazonian deforestation and climate change. *Science*, 247, 1322-1325.

Sinclair T.R. 1986 Water and nitrogen limitations in soybean grain production I - Model development. *Field Crops Research*, 15, 125-141.

Sitch S., Smith B., Prentice I.C, and others 2003 Evaluation of ecosystems dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob. Change Bio.*, 9, 161-185.

Smagorinsky J. 1953 Dynamical influence of large-scale heat source and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*, 79, 342-366.

Smith Pa. 2001 Etablissement de correspondances entre le fonctionnement physiologique de la canne à sucre et le concept du modèle STICS. Calibration des modules de développement, de croissance aérienne, d'élaboration du rendement et de la qualité pour la variété R570. *Mémoire de DAA, ENSA Rennes*, 63p.

Smith P. 2001a Considering carbon manure and carbon sequestration. *Science*, 287, 428-429.

Smith P., Gouling K.W., Smith K.A., Powlson D.S., Smith J.U., Fallon P.D., Coleman K. 2001b Enhancing the carbon sink in European agricultural soils : including traces gaz fluxes in estimates of carbon mitigation potential. *Nutrient cycling*, 60, 237-252.

Smith P., Powlson D.S., Smith J.U., Falloon P., Coleman K. 2000a Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology*, 6, 525-539.

Smith P., Milne R., Powlson D.S., Smith J.U., Falloon P.D. Coleman K. 2000b Revised estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land. *Soil Use and Management*, 16, 293-295.

Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., McGill, W.B., Arah J.R.M., Chertov O.G., Coleman K., Franko U., Frolking, S, Jenkinson, D.S., Jensen, L.S., Kelly, R.H., Klein-Gunnewiek H., Komarov A. Li C., Molina J.A.E., Mueller T., Parton W.J., Thornley J.H.M., Whitmore A.P. 1997 A

comparison of the performance of nine soil organic matter models using seven long-term experimental datasets. *Geoderma*, 81, 153-225.

STICS 2003 « Séminaire STICS », Arles 23 – 24 janvier 2003, Recueil de résumés. éd. INRA 203p.

Tans P.P., Fung I.Y., Takahashi T. 1990 Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. *Science*, 247, 1431-1439.

Texier D., de Noblet-Ducoudré N., Harrison S.P., Haxeltine A., Joussaume S., Jolly D., Laarif F., Prentice I.C., Tarasov P. 1997 Quantifying the role of biosphere-atmosphere feedbacks in climate change: a coupled model simulation for 6000 yr BP and comparison with palaeodata for northern Eurasia and northern Africa. *Clim. Dyn.*, 13, 865-882.

Van Deipen C.A., Wolf J., Van Keulen H., Rappoldt C. 1989 WOFOST : a simulation model of crop production. *Soil Use Manage*, 5, 16-24.

Viovy N. 1997 Interannality and CO<sub>2</sub> sensitivity of SECHIBA-BGC and coupled SVAT-BGC model. *Phys. Chem. Earth*, 21, 489-497.

Vitousek P. M., Mooney H. A., Lubchenco J., Melillo J. M. 1997 Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499.

Vleeshouwers L.M., Verhagen A. 2002 Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Glob. Chang. Biol.*, 8, 519-530.

Weir A.H., Bragg P.L., Porter J.R., Rayner J.H. 1984 A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *Journal of the Agriculture Science, Cambridge*, 102, 371-382.

Williams J.R., Jones C.A., Dyke P.T. 1984 A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE*, 27, 129-144.

De Wit C.T. 1978 Simulation of assimilation respiration and transpiration of crops. *Simulation monographs, Pudoc. Wageningen*. 101p.

De Wit C.T., Brouwer R., Penning de Vries F.W.T. 1970 The simulation of photosynthetic systems. In: *Setlik, I. (Ed.) Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen* pp. 47-50.

Wullschleger S.D. 1993 Biochemical limitations to carbon assimilation in C<sub>3</sub> plants A retrospective analysis of the A / C<sub>i</sub> curves from 109 species. *J. of Experimental Botany*, 44 (262) 907-920.

Xue Y. 1996 The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate. *J. Climate*, 9, 2173-2189.

Xue Y., Shukla X. 1993 The influence and land surface properties on Sahel climate part I: deforestation. *J. of Climate*, 7, 859-863.

Xue Y., Shukla X. 1996 The influence of land surface properties on Sahel climate part II: afforestation. *J. of Climate*, 6, 656-674.

Zhao M., Pitman A.J., Chase T. 2001 The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dynamics*, 17, 467-477.

Zheng H., McGuffie K., Henderson-Sellers C. 1997 Impact of tropical deforestation part II the role of large-scale dynamics. *J. of Climate*, 7, 2498-2521.

Zobler L. 1986 A World Soil File for Global Climate Modelling. *NASA Technical Memorandum no 87802*.