

CNRS - Université Pierre et Marie Curie - Université Versailles-Saint-Quentin
CEA - ORSTOM - Ecole Normale Supérieure - Ecole Polytechnique

Institut Pierre Simon Laplace

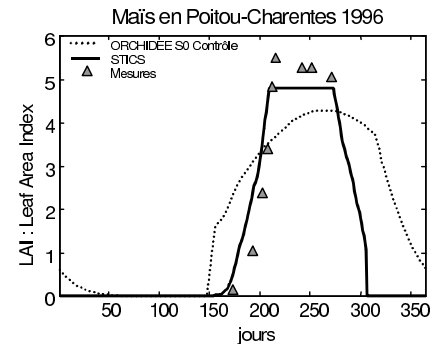
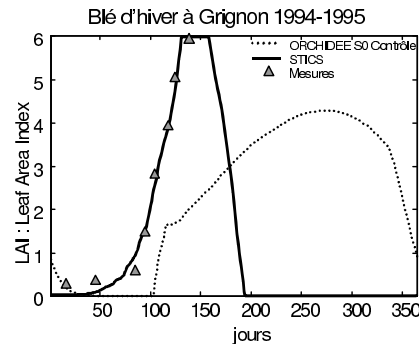
des Sciences de l'Environnement Global

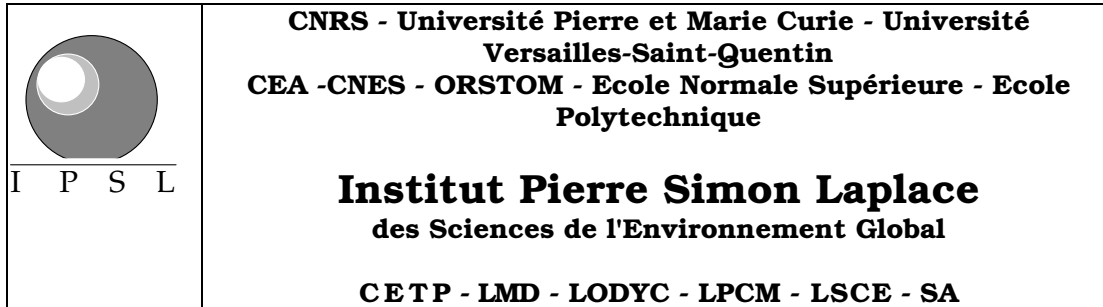
Notes du Pôle de Modélisation

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), Nadine Brisson (2), Bernard Seguin (2)

(1) Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette, France
(2) INRA - Unité Climat, Sol et Environnement, Avignon, France





Université Pierre-et-Marie-Curie
B 102 - T15-E5 - 4, Place Jussieu
75252 Paris Cedex 05 (France)
Tél : (33) 01 44 27 39 83
Fax : (33) 01 44 27 37 76

Université Versailles-Saint-Quentin
5, Boulevard d'Alembert
78280 Guyancourt (France)
Tél : (33) 01 39 25 58 23
Fax : (33) 01 39 25 58 22

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.

Novembre 2002 , Note n° 24

In this study, we try to ameliorate the representation of croplands into the global biosphere model ORCHIDEE. The agrosystems cover about 30% of the land surface and 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.

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 sahéniennes 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°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°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°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 m² 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°C·j) est nettement inférieur à celui du maïs (400°C·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 °C·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°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 $V_{jmax}=260 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. 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 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 $V_{jmax} = 220 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$, 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 $V_{jmax} = 200 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$. 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 (σ_w), en lumière (σ_l), et en azote (σ_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 ρ_w est le rapport mensuel entre la capacité d'absorption racinaire réelle et sa valeur maximale, et σ_{n1} (respectivement σ_{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:

$$f_g = f_{g0}$$

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

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

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

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

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):

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

$$NPP_l = x \cdot f_l \cdot (1 - f_g) NPP$$

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

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

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

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'_l), le signe prime représentant le nouveau calcul de l'allocation.

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

$dLAI / dt$ 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 ζ_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. 250gC.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 50gC.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⁻²) (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 Choisnel (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 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).

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

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 sm^{-1} avec la nouvelle version contre $70-80 \text{ sm}^{-1}$ 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 sm^{-1}). La résistance totale est passée de 155 sm^{-1} à 120 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°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_{cmax} et V_{jmax} 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 1mm.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 $-2\text{gC.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$) 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_{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 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 CO₂ assimilation in leaves of C3 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.
- 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_{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 CO₂ content. *thesis Postman University* 303p.

Viovy N. 1997 Interannality and CO₂ 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 C₃ plants A retrospective analysis of the A / C_i 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

variables de forçage		
	ORCHIDEE	STICS
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
processus		
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)
variables : prognostiques ou diagnostiques		
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

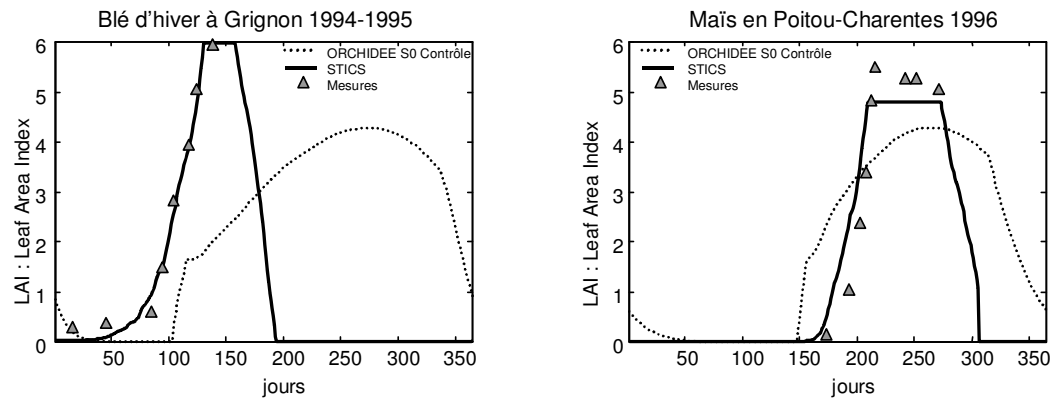


fig. 1 Indices foliaires simulés dans ORCHIDEE S0 (Contrôle)(pointillés), STICS (traits pleins) et les observations (triangles)

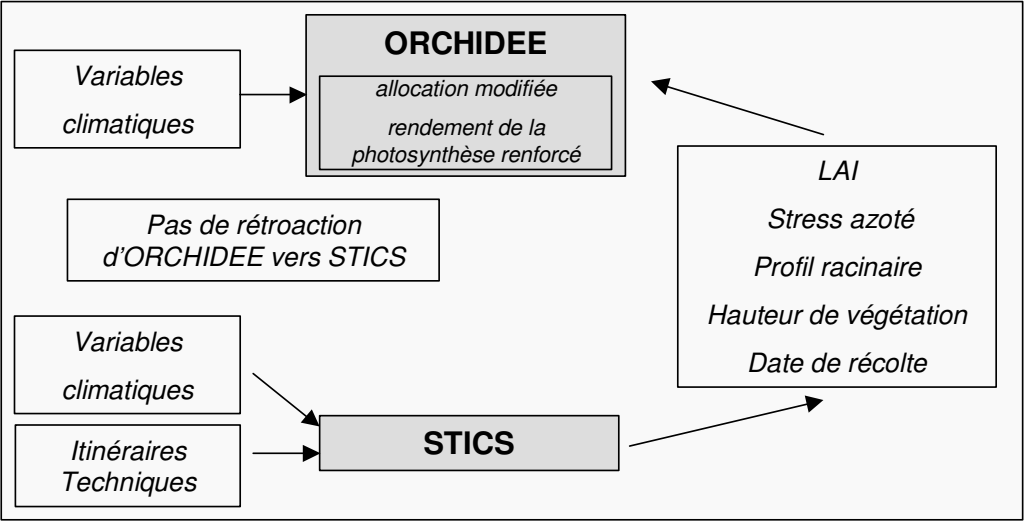


fig. 2 Schéma de couplage entre ORCHIDEE et STICS

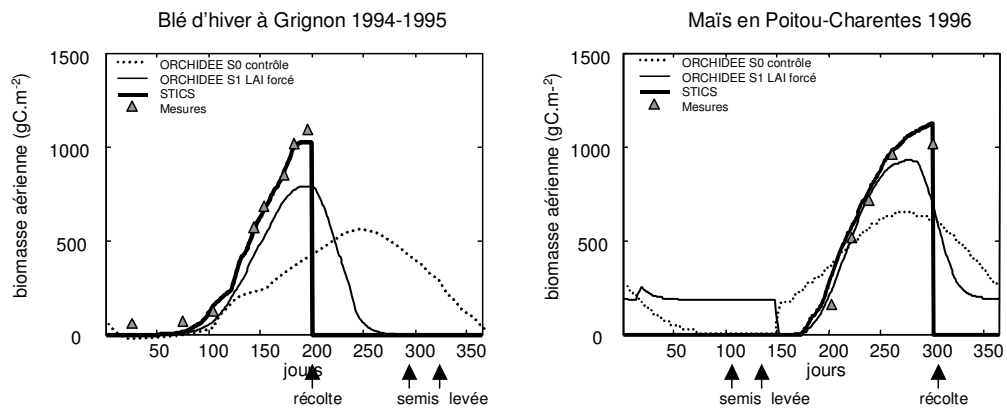


fig. 3 biomasses aériennes simulées dans ORCHIDEE S0 (version standard) (pointillés), ORCHIDEE S1 (forcé par le LAI de STICS) (trait continu fin), STICS (traits pleins épais) et les mesures (triangles)

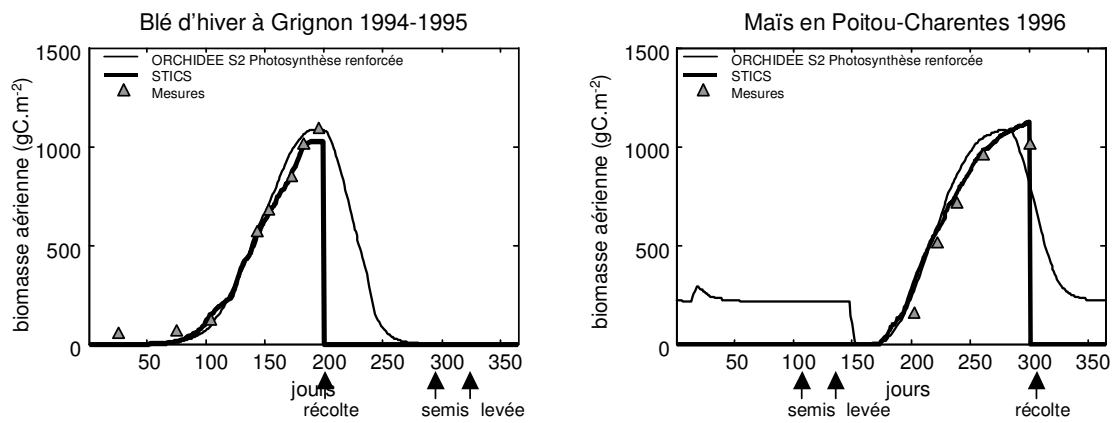


fig.4 biomasses aériennes simulées dans ORCHIDEE S2 (photosynthèse renforcée) (trait continu fin) STICS (traits pleins épais) et les mesures (triangles)

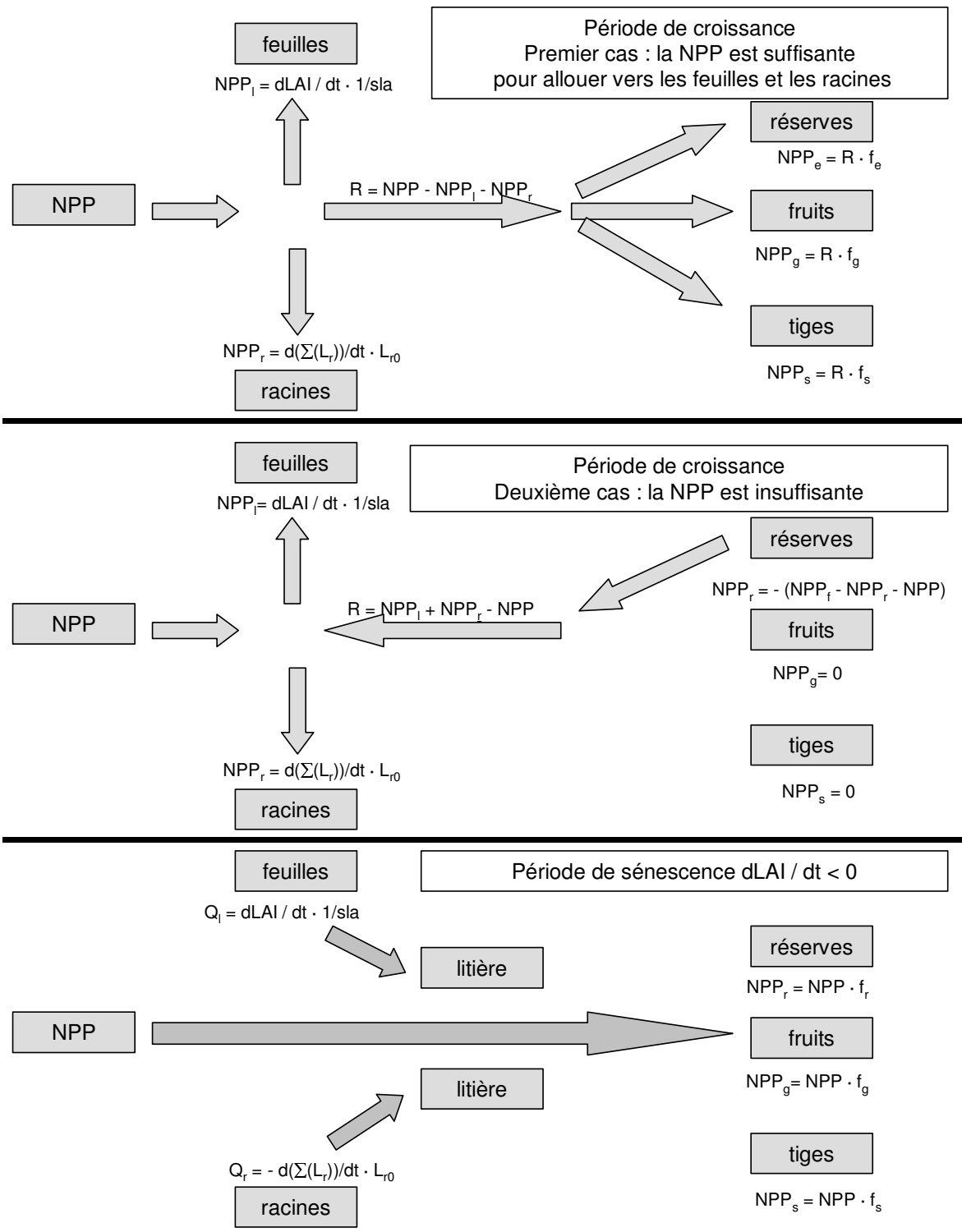
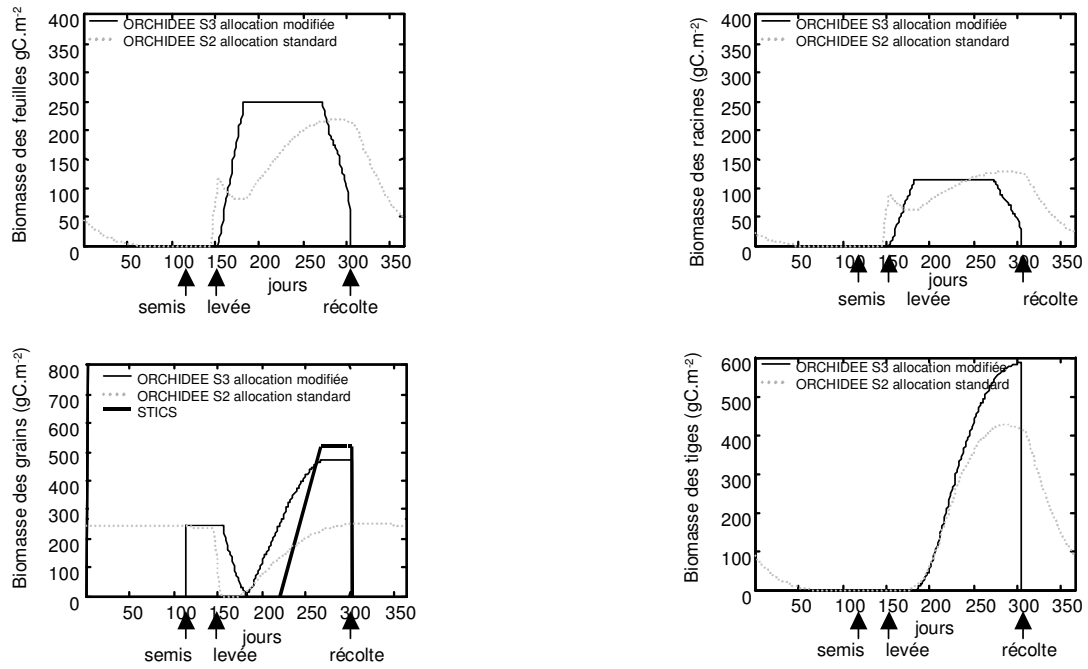


fig. 5 schéma d'allocation proposé dans le cas où le LAI est prescrit.
La signification des abréviations est donnée dans le texte.

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)

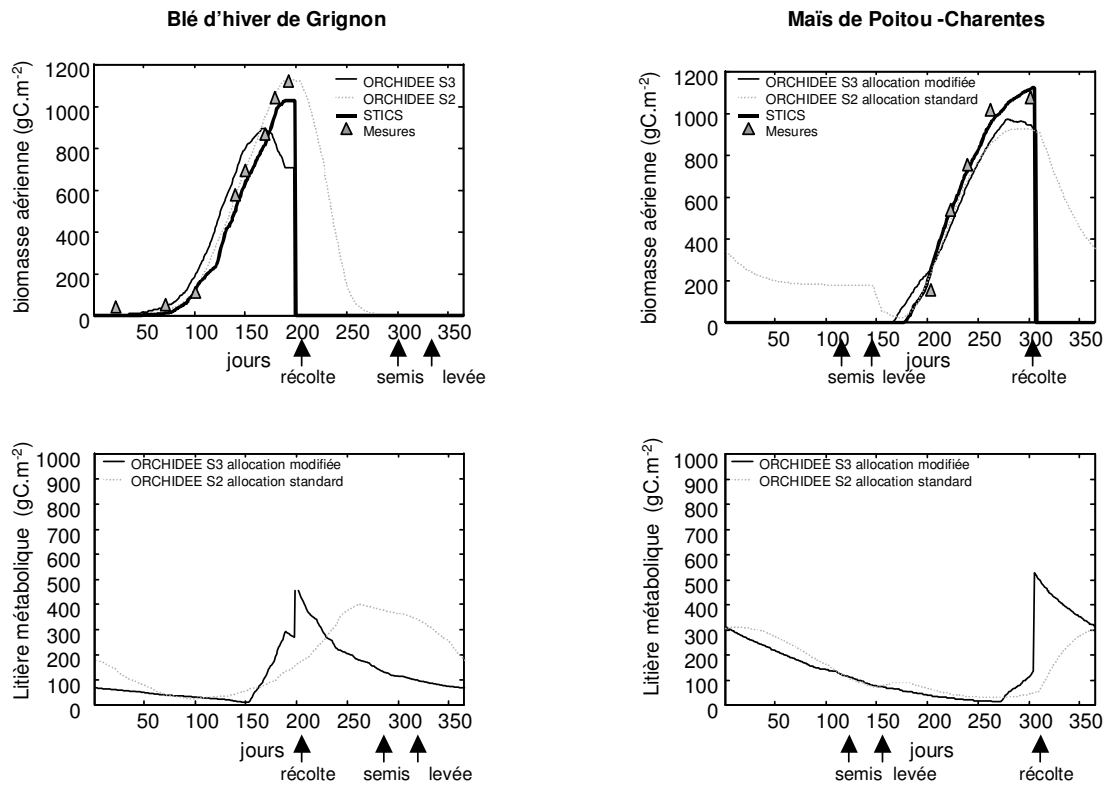
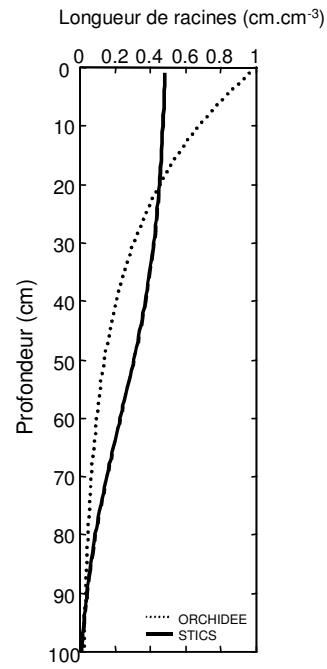


fig. 7 Quantités de biomasse aérienne et de litière simulées avec ORCHIDEE S3 (la date de récolte est forcée par STICS) comparées à S2 (pas de récolte)

Maïs 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

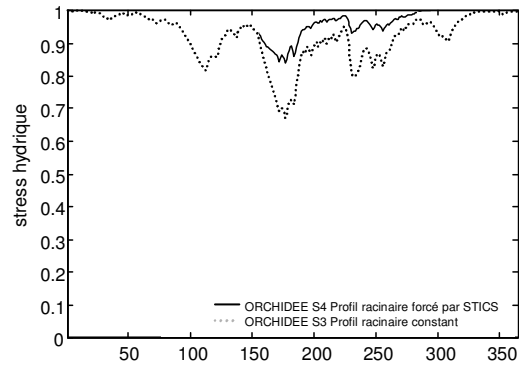


fig. 9 Stress hydrique simulé par ORCHIDEE avec le profil racinaire forcé par STICS (S4) (en trait continu) et prescrit (S3) (en pointillés)

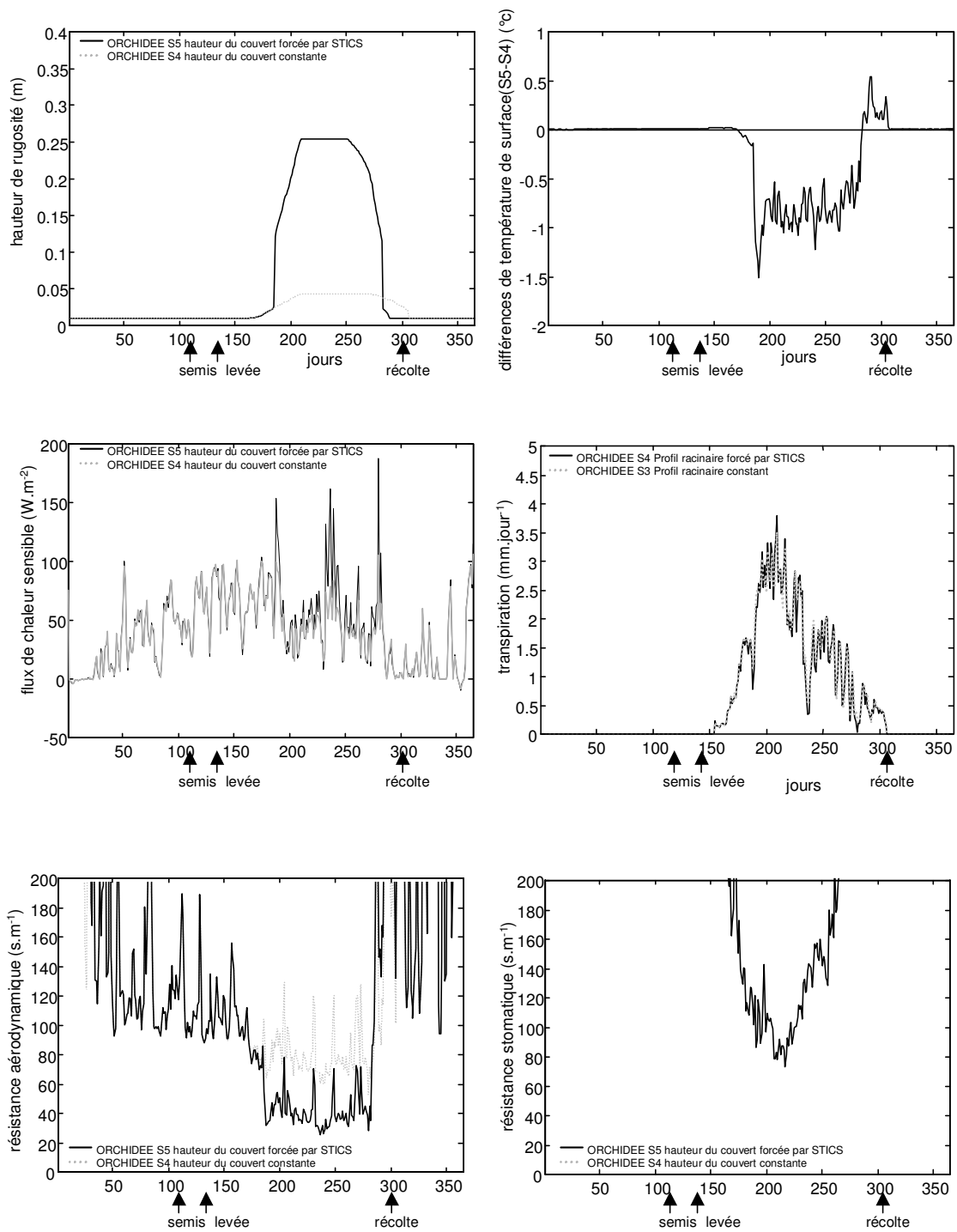


fig. 10 Simulations réalisées avec S5 (hauteur du couvert lue dans STICS) (trait continu noir) et S4 (pointillés gris) (hauteur du couvert prescrite constante) sur le site de maïs de Poitou - Charentes

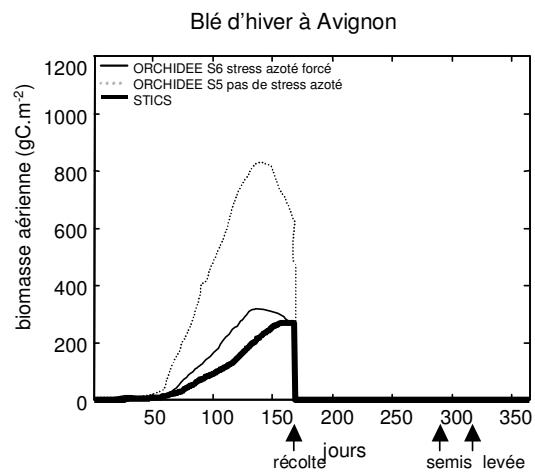
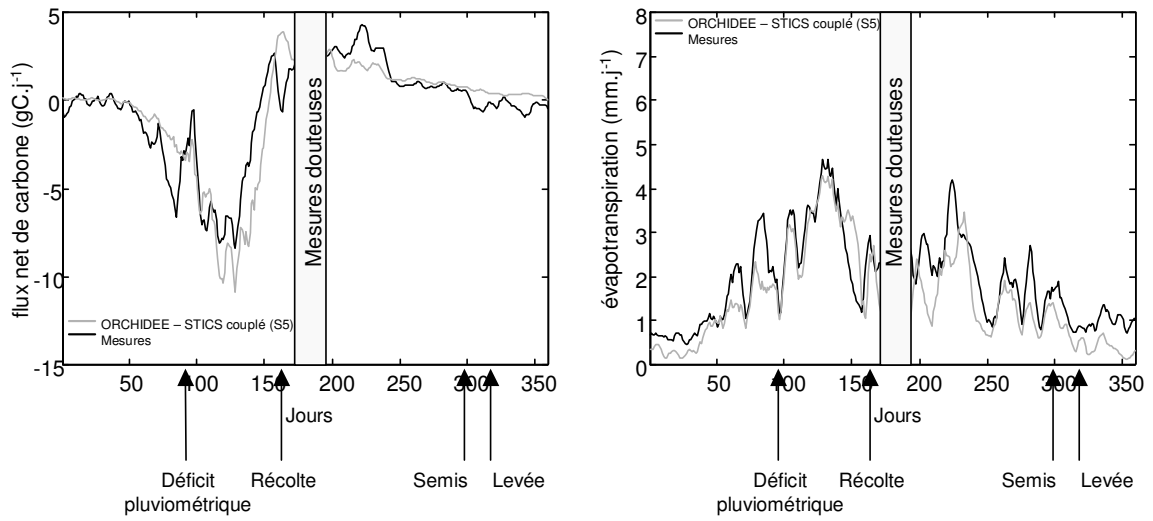


fig. 11 Biomasse aérienne simulée par ORCHIDEE S5 (pas de stress azoté) (en pointillés) et S6 (stress azoté forcé par STICS) (en trait fin) et par STICS (en trait épais) dans le cas d'un site stressé en azote

Site de blé d'hiver de Ponca (Oklahoma)



Site de maïs de Bondville (Illinois)

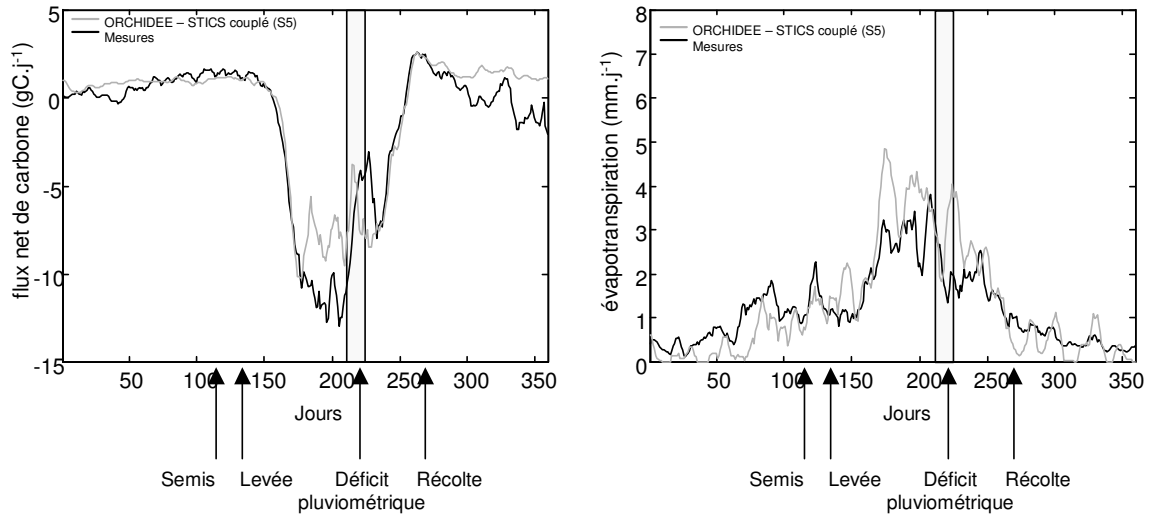


Fig. 12 Comparaison des flux de carbone et d'eau simulés par ORCHIDEE – STICS (S6) (en gris) et les mesures (en noir) pour le site de blé de Ponca (en haut) et le site de maïs de Bondville (en bas). Les courbes présentées sont des moyennes glissantes sur 5 jours.

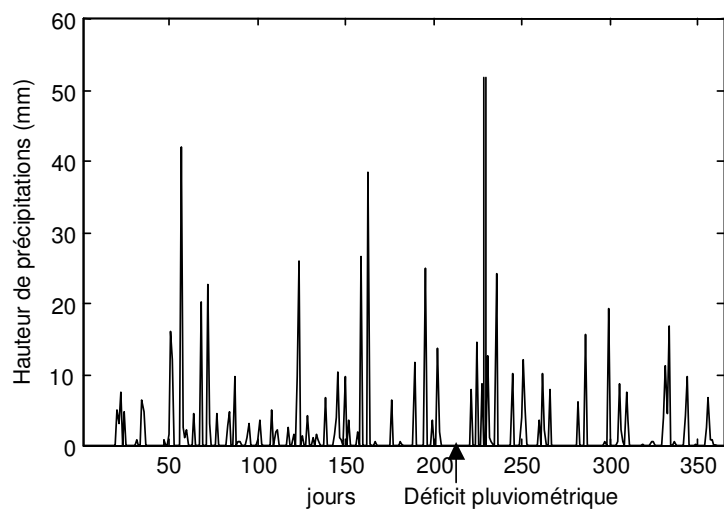


fig. 13 Précipitations quotidiennes mesurées sur le site de Bondville en 1997

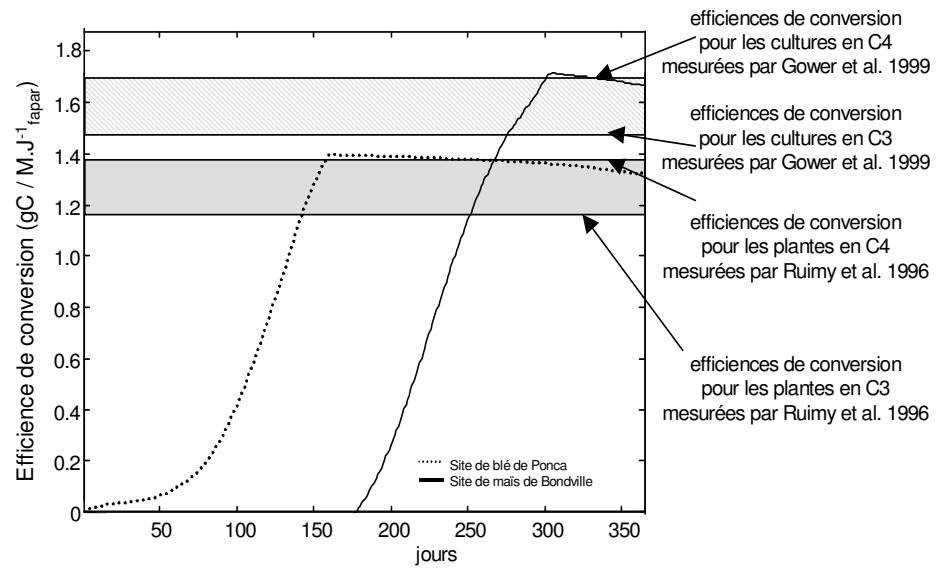


fig. 14 Efficacités de conversion simulées sur le site de blé de Ponca (en pointillés) et sur le site de maïs de Bondville (en trait plein)

Déjà paru :

- 12 : **Janvier 1999** Marc Guyon, Gurvan Madec, François-Xavier Roux, Christophe Herbaut, Maurice Imbard, and Philippe Fraunie, *Domain Decomposition Method as a Nutshell for Massively Parallel Ocean Modelling with the OPA Model* .
- 13 : **Février 1999** Eric Guilyardi, Gurvan Madec, and Laurent Terray, *he Role of Lateral Ocean Physics in the Upper Ocean Thermal Balance of a Coupled Ocean-Atmosphere GCM*
- 14 : **Mars 1999** D. Hauglustaine, *Impact of Biomass Burning and Lightning Emissions on the Distribution of Tropospheric Ozone and its Precursors in the Tropics*
- 15 : **Décembre 1999** L. Menut, R. Vautard, C. Honnoré, and M. Beekmann, *Sensitivity of Photochemical Pollution using the Adjoint of a Simplified Chemistry-Transport Model*
- 16 : **Janvier 2000** J.-Ph. Boulanger, *The Trident Pacific model. Part 1: The oceanic dynamical model and observations during the TOPEX/POSEIDON period*
- 17 : **Janvier 2000** J.-Ph. Boulanger and Christophe Menkes, *The Trident Pacific model Part 2: The thermodynamical model and the role of long equatorial wave reflection during the TOPEX/POSEIDON period*
- 18 : **Octobre 2000** H. Le Treut and B. McAvaney, *A model intercomparison of equilibrium climate change in response to CO₂ doubling*
- 19 : **Octobre 2000** Pierre Friedlingstein, Laurent Bopp, Philippe Ciais, Jean-Louis Dufresne, Laurent Fairhead, Hervé LeTreut, Patrick Monfray, and James Orr, *Positive feedback of the carbon cycle on future climate change*
- 20 : **Février 2001** Agnès Ducharne, Catherine Golaz, Etienne Leblois, Katia Laval, Emmanuel Ledoux, and Ghislain de Marsily, *RiTHM (River Transfer Hydrological Model) : a Runoff Routing Scheme for GCMs*
- 21 : **Octobre 2001** Y. Le Clainche, P. Braconnot, O. Marti, S. Joussaume, J-L. Dufresne, and M-A. Filiberti, *The role of sea ice thermodynamics in the Northern Hemisphere climate as simulated by a global coupled ocean-atmosphere model*
- 22 : **Janvier 2002** P. de Rosnay, *A GCM experiment on time sampling for remote sensing of near-surface soil moisture*
- 23 : **Juillet 2002** O. Boucher, M. Pham, C. Venkataraman, *Simulation of the atmospheric sulfur cycle in the Laboratoire de Météorologie Dynamique General Circulation Model. Model Description, Model Evaluation, and Global and European Budgets*
- 24 : **Novembre 2002** S. Gervois, N. Viovy, N. de Noblet, P. Ciais, N. Brisson, B. Seguin, *Vers une meilleure prise en compte des surfaces cultivées dans un modèle global de biosphère (ORCHIDEE): Couplage avec un modèle agronomique (STICS)*

Plus de détails sont disponibles sur Internet :
<http://www.ipsl.jussieu.fr/poles/Modelisation/NotesSciences.htm>