THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité : Science du Climat et de l'Environnement

Présentée par

Pascalle Smith

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Thèse effectuée au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnment CEA-CNRS-UVSQ

Titre de la thèse :

Modélisation des cultures européennes au sein de la biosphère : phénologie, productivité et flux de CO_2 .

à soutenir le 30 Mai 2008 devant le jury composé de:

Jean-Christophe	Calvet	$\operatorname{Rapporteur}$
Martine	Guérif	Rapporteur
Katia	Laval	Examinatrice
Alberte	Bondeau	Examinatrice
Bernard	Seguin	$\operatorname{Examinateur}$
Philippe	Ciais	Directeur de thèse
Nathalie	de Noblet-Ducoudré	Co-directrice de thèse

Table des matières

In	trod	uction		3
	0.1	Importa	ance de la biosphère continentale dans le cycle du carbone et contribution	
		des surfa	aces cultivées	4
		0.1.1	Effet de serre naturel	4
		0.1.2 1	Perturbation par l'Homme du cycle du carbone	5
		0.1.3]	Evolution des surfaces cultivées	7
		0.1.4 I	Incertitudes sur le bilan de carbone européen	9
	0.2	Modélis	sation de la composante agricole	12
		0.2.1 I	Modèles de climat, de biosphère et de cultures	12
		0.2.2]	Etat de l'art de la représentation des cultures dans un modèle de biosphère	14
		0.2.3	Objectifs de la modélisation régionale des surfaces cultivées	18
		0.2.4	Organisation de la thèse	19
1	\mathbf{Les}	surfaces	s cultivées dans le modèle couplé ORCHIDEE-STICS : description	
	et a	daptatio	on pour des simulations européennes	21
	1.1	Historiq	que d'ORCHIDEE-STICS et poursuite de son développement	23
		1.1.1 (Complémentarité d'ORCHIDEE et de STICS	23
		1.1.2 (Consolidation d'ORCHIDEE-STICS en une plate-forme "client-serveur" .	29
	1.2	Fonction	nnement des surfaces cultivées dans ORCHIDEE-STICS	34
		1.2.1 I	Développement du couvert et propriétés bio-physiques de la surface	34
		1.2.2 I	Productivité et bilan de carbone	41
	1.3	Simulati	ions à l'échelle de l'Europe	50
		1.3.1 I	Forçages atmosphériques	50
		1.3.2 I	Paramètres du sol	51
		1.3.3 (Carte de végétation	51
		1.3.4 I	Pratiques agricoles	56
		1.3.5 J	Jeux de simulations et échelle spatio-temporelle	56
\mathbf{E}	valua	tion d'C	ORCHIDEE-STICS sur l'Europe	59
	Arti	cle à sou	mettre à Global Biogeochemical Cycles, introductif aux chapitres $2, 3$ et 4	59
2	Сус	cle saisor	nnier foliaire des cultures européennes	93
	2.1	Observa	tions satellitaires et phénologie dans ORCHIDEE-STICS	95
		2.1.1 I	Evaluation préliminaire du LAI avec le jeu de données NOAA-AVHRR	
		I	mensuelles du GIMMS [Myneni et al., 1997]	95
		2.1.2 N	Méthode d'obtention du jeu de DVI NOAA-AVHRR corrigés journaliers	
		C	du LSCE [Bacour <i>et al.</i> , 2006]	95
		2.1.3 (Comparaison des caractéristiques des LAI GIMMS et DVI LSCE	97
		2.1.4 I	Phénologie simulée par PFT et pour l'ensemble de la végétation	106
	2.2	Amélior	ation de la simulation du cycle saisonnier du LAI	109
		2.2.1 0	Caractéristiques du double-pic simulé par ORCHIDEE-STICS et observé .	109
		2.2.2 A	Apport d'ORCHIDEE-STICS par rapport à ORCHIDEE	112
	2.3	Extracti	ion de la contribution des surfaces cultivées au DVI	117

		.3.1 Méthodologie utilisant deux cartes d'occupation du sol	$117 \\ 120$			
	2.4	Détermination de la meilleure combinaison de phénologies pour l'Europe	125			
		.4.1 Distribution spatiale des corrélations avec les observations	125			
		.4.2 Discussion sur le choix du diagnostic	129			
		.4.3 Pistes pour l'amélioration de la répartition et de la phénologie des cultures				
		en Europe dans le modèle	133			
		.4.4 Conclusions et perspectives	137			
	Synt	ese sur le cycle saisonnier foliaire des cultures en Europe	139			
3	Pro	activité moyenne, inter-annuelle et extrême des cultures européennes	141			
	3.1	lotion de rendement et étapes de son évaluation	143			
		.1.1 Préalable à l'évaluation du rendement	143			
		.1.2 Evaluation des "rendements" simulés vis-à-vis des statistiques FAO	144			
		1.3 Extension à l'évaluation de la productivité moyenne agricole européenne .	150			
	3.2	léponse des cultures aux extrêmes 1976 et 2003	159			
		2.1 Intensité des anomalies de productivité simulées et observées	159			
		2.2 Caractéristiques des anomalies de forçage climatique en 1976 et 2003	161			
		.2.3 Changements d'efficience d'utilisation de l'eau	165			
	~	.2.4 Changements d'efficience d'assimilation du CO_2	171			
	Synt	se sur la productivité moyenne, inter-annuelle et extrême des cultures	176			
4	And	alie de flux net de carbone en 2003 en Europe	179			
	4.1	Iéthodes d'estimations du flux net de carbone	181			
		.1.1 Approche directe ou "Bottom-up"	181			
		.1.2 Approche inverse ou "Top-down"	181			
	4.2	Comparaison des NEE d'ORCHIDEE-STICS aux deux inversions globales	184			
		.2.1 Détection d'une source anormale de carbone en Europe en 2003	184			
		.2.2 Développement temporel de l'anomalie européenne	185			
		.2.3 Structure spatiale de l'anomalie saisonnière	189			
		.2.4 Limites aux apports de l'approche inverse	191			
	4.3	Contribution des flux bruts à la NEE simulée	195			
		.3.1 Evolution saisonnière de la NPP et de la respiration hétérotrophe	195			
		.3.2 Distribution spatiale de la NPP et de la Rh	199			
		.3.3 Bilan des effets de l'été 2003 et de la prise en compte de l'agriculture sur	201			
		34 Discussion	201			
	Synt	ese sur les flux de carbone européens en 2003	204 206			
Co	onclu	on - Perspectives	209			
\mathbf{A}	EOS	Meeting report : "Advances in Large-Scale Crop Modeling"	219			
в	Art	e publié dans <i>Global Change Biology</i> (Mars 2007)	221			
	"Mo	lling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance'	221			
С	Par	cipation au module LCC (Land Cover Change) d'ORCHIDEE	251			
п	Con	ibution au rapport de projet APR GICC2 2003	253			
D	"Ada	tation des systèmes européens de production agricole au changement climatique :	200			
	premiers essais d'évaluation"					
Bi	Bibliographie 20					
Lis	ste d	acronymes	279			

Introduction

Dans le contexte des changements climatiques, comprendre l'évolution récente et projeter l'évolution future du climat, de la productivité végétale et de leur interaction à l'échelle du globe, apparaissent comme des priorités. Afin d'y répondre, la communauté scientifique a recours à la modélisation. La mise en équation des processus permet de tester de nombreuses configurations de paramètres qui ne peuvent être expérimentées dans la nature à cette échelle. Les modèles de climat possèdent entre autres une composante "surfaces continentales".

Les surfaces continentales sont importantes en tant que maillon des grands cycles énergétique, hydrologique et de matière de la planète. Elles ne font pas que subir le climat qui détermine la distribution, la structure et le fonctionnement des écosystèmes; elles participent également à moduler son état moyen et sa variabilité. Cette retro-action passe par les propriétés physiques, chimiques, et biologiques de la surface, qui sont variables dans le temps et dans l'espace. Les continents sont couverts pour la plupart de végétation, qui présente un cycle saisonnier plus ou moins marqué selon la latitude. Or la végétation régule la température, les précipitations et la composition de l'atmosphère en différents gaz. Son exploitation et sa destruction croissantes par l'Homme pour satisfaire ses besoins modifient ses propriétés et affectent tous les échanges dont le feuillage et le sol sont le support.

Les modèles de surfaces continentales se sont perfectionnés au fur et à mesure : la perturbation par l'Homme des équilibres à la surface des continents, entre autres *via* les modifications de la couverture végétale, est à présent prise en compte. Cependant, l'implantation des cultures était encore récemment représentée de manière très simplifiée. Les écosystèmes cultivés représentent pourtant au moins 25% des surfaces terrestres couvertes par de la végétation.

La première partie de cette introdution (0.1) explique pourquoi cette thèse s'intéresse à la modélisation des surfaces cultivées actuelles, en Europe, à leur contribution au cycle du carbone et à leur réponse aux évènements climatiques extrêmes. Dans la deuxième partie (0.2), on explique comment l'intégration d'une représentation des surfaces cultivées dans les modèles de surfaces continentales a été abordée dans la communauté. Puis on présente les objectifs de l'approche qui fait l'originalité de cette thèse. Enfin on précise l'organisation des chapitres qui la composent.

0.1 Importance de la biosphère continentale dans le cycle du carbone et contribution des surfaces cultivées

0.1.1 Effet de serre naturel

Le rayonnement solaire fournit à la Terre une énergie moyenne de 342 W par m^2 de sa surface (Fig. 1). 30% de cette énergie est réfléchie directement vers l'espace par les nuages, les aérosols et la surface de la Terre. Les 70% restants sont absorbés par l'atmosphère (20%) et par la surface (50%), qui se réchauffe. La Terre ré-emet de l'énergie vers l'atmosphère entre autres sous forme de rayonnement thermique dans l'infra-rouge. Une partie de cette énergie est piégée par les molécules de Gaz à Effet de Serre (GES) puis ré-émise en partie vers la surface terrestre. Cette deuxième étape de circulation de l'énergie qui réchauffe encore plus la surface (et refroidit la haute atmosphère) constitue l'effet de serre. Sans atmosphère, la température à la surface terrestre serait de -18°C. Grâce à l'effet de serre naturel, elle est de $+15^{\circ}C$. Les gaz à effet de serre comme la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO_2) contribuent respectivement à 62% $(20.6^{\circ}C)$ et 22% $(7.2^{\circ}C)$ de cette augmentation naturelle de 33°C de la température d'équilibre. Au cours des deux derniers millénaires et jusqu'en 1750, la concentration en CO_2 dans l'atmosphère a très peu varié $(280ppm \pm 10ppm)$, de même que celle en méthane (CH₄) et en oxyde nitreux (N_2O) (Fig. 2). Cette stabilité résultait de l'équilibre entre flux bruts de gaz échangé dans les deux sens (émission, absorption) entre l'atmosphère et les autres compartiments (biosphère continentale, océan). Des mesures de la composition du CO_2 en isotope ¹⁸O de l'oxygène [Francey & Tans, 1987] ont permis de quantifier ces flux bruts : ≈ 120 Giga-tonnes (10^9t) de carbone étaient absorbées par la photosynthèse de la végétation et quasiment la même quantité émise par respiration de la végétation (autotrophe) et des sols (hétérotrophe). $\approx 70GtC$ étaient échangés par an entre l'atmosphère et l'océan (Fig. 3).



FIG. 1 – Bilan d'énergie annuel global de la Terre. La quantité de rayonnement solaire absorbée par la surface et l'atmosphère est compensée par celle de rayonnement infra-rouge émis par la surface et l'atmosphère (W/m^2) . Source : Kiehl & Trenberth [1997], IPCC [2007].

0.1.2 Perturbation par l'Homme du cycle du carbone

Les **émissions liées aux activités humaines** sur les continents depuis le début de l'ère industrielle (combustion d'énergies fossiles comme le charbon, pétrole et gaz naturel) ont entraîné une augmentation de la concentration en CO_2 (+30%, Fig. 2). Cette perturbation ($\approx 6.4GtC/an$ en moyenne sur 1990-2000) est partiellement compensée par une absorption nette accrue de CO_2 par la biosphère continentale ($2.6 - 1.6 \approx 1GtC/an$) et l'océan de surface ($\approx 2.2GtC/an$) (Fig. 3). Le déséquilibre restant conduit à une accumulation annuelle de $\approx 3.1GtC$ dans l'atmosphère (Fig. 3). Cette accumulation, ajoutée à celle d'autres gaz, engendre un **forçage radiatif additionnel** de $2.4W/m^2$. La **contribution du CO**₂ est la plus importante : **60%**. La teneur en méthane a augmenté de +150% à cause en particulier de la culture du riz, de l'élevage bovin et de la décomposition anérobie. Le CH₄ contribue à 20% de cet effet de serre additionnel. La teneur en oxyde nitreux, émis entre autres du fait de l'utilisation d'engrais azotés en agriculture, a augmenté de 14% et contribue à hauteur de 4% à l'effet de serre additionnel. Les hydrocarbures fluorés apparus avec l'industrie chimique contribuent à hauteur de 16%.



FIG. 2 – Evolution sur 2000 ans des concentrations atmosphériques globales (ppm ou ppb) en GES à longue durée de vie. Source : IPCC [2007].

Le flux net de CO_2 de $\approx 1GtC/an$ échangé entre la biosphère (végétation & sols) et l'atmosphère se décompose en deux termes de signe opposé : le puits biosphérique et les émissions dûes aux changements d'utilisation des sols.

• La biosphère continentale assimile par photosynthèse $\approx 2.6GtC/an$ supplémentaires (Fig. 3) par rapport à l'état d'équilibre pré-industriel. L'effet fertilisant¹ du CO₂ permet d'expliquer en partie ce **puits biosphérique**. La localisation, l'intensité et les causes du puits sont incertaines mais le plus probable est que les **moyennes latitudes** de l'**hémisphère Nord** en soient responsables [Tans *et al.*, 1990; Bousquet *et al.*, 2000; Bonan, 2002]. En effet, les écosystèmes terrestres présents sous ces latitudes jouent un rôle important (80% selon Randerson *et al.* [1997]) dans l'amplitude des variations saisonnières de la concentration en CO₂ atmosphérique, visible sur la figure 4. Pendant la saison de croissance estivale, ces écosystèmes absorbent du CO₂ et font baisser sa concentration de 20*ppm*. Au sein de ces écosystèmes tempérés, les surfaces cultivées comptent pour $\approx 20\%$ du cycle saisonnier [Randerson *et al.*, 1997]. Outre la fertilisation par le

¹augmentation de la productivité végétale suite à la stimulation de la photosynthèse par l'augmentation de la concentration en CO_2



FIG. 3 – Bilan de carbone annuel global pour les années 1990. Les flux annuels pré-industriels "naturels" (noir) et "anthropiques" (rouge) sont exprimés en GtC/an et la quantité de carbone dans les réservoirs en 1994 ou flux cumulés depuis 1750, en GtC. Source : IPCC [2007].



FIG. 4 – Concentration atmosphérique moyennée par bande de latitude en CO_2 sur les 10 dernières années (ppm). Source : Université du Colorado.

 CO_2 , plusieurs mécanismes peuvent expliquer ce stockage de carbone dans la biosphère continentale : l'augmentation des températures et l'allongement de la saison de croissance [Myneni *et al.*, 1997] et la levée de la limitation naturelle en azote *via* les dépôts secs et humides provenant de l'atmosphère polluée et *via* l'apport de fertilisants agricoles [Bonan, 2002]. • Le changement d'occupation des sols annule une partie du puits biosphérique en émettant 1.6GtC/an (en moyenne sur 1990-2000) (Fig. 3); Houghton [2003] a estimé à 156GtC le déstockage de carbone des sols et de la végétation entre 1850 et 2000. Ce flux de carbone vers l'atmosphère est attribué à 90% à la déforestation tempérée et boréale (1/3) puis tropicale (2/3) et à 10% à la mise en culture de prairies.

0.1.3 Evolution des surfaces cultivées

La surface globale occupée par les cultures en l'an 2000 représente ≈ 14 millions de km^2 , soit 3 fois plus qu'il y a 150 ans (Fig. 6). Les cultures couvrent plus de 25% des terres émergées hors déserts chauds et froids (plus de 50% si l'on y associe les prairies gérées) et se concentrent dans les zones tempérées de l'Europe, des Etats-Unis, de l'Argentine et de la Chine ainsi qu'en Inde et Afrique Sahélienne (Fig. 5). L'étendue des surfaces cultivées devrait continuer à augmenter au cours du prochain siècle d'après les projections d'Alcamo *et al.* [1998], essentiellement dans les zones tropicales. L'expansion des surfaces cultivées répond à une demande croissante en produits alimentaires pour humains et bétail, textiles et en énergie, qui suit l'accroissement exponentiel de la population d'1 à 5.5 milliards en 150 ans (Fig. 6). Le fait que cette surface n'augmente, depuis 1960, plus aussi rapidement qu'elle ne tendait à le faire au cours du siècle qui a précédé tient à une intensification de l'agriculture (mécanisation, sélection génétique), devenant plus productive pour une même surface. Cette intensification se traduit par un doublement (riz) voir triplement (blé) des rendements céréaliers en 50 ans. Cette augmentation de la productivité a été rendue possible par l'introdution et l'usage massif des engrais minéraux, en parallèle d'un recours croissant à l'irrigation (Fig. 6).



FIG. 5 – Fractions de surfaces cultivées en 2000. Source : Ramankutty et al. [2008].

En France, la part de la consommation d'eau annuelle attribuée à l'irrigation est de 14% dont 60% sont "consommés" et ne retournent pas au milieu naturel (Source : Ministère de l'Ecologie, du développement et de l'aménagement durables). En Europe de l'Ouest, ce sont près de 40% du territoire potentiellement couvert de végétation que les surfaces cultivées occupent (70% si l'on y associe les prairies). Les forêts européennes ne sont plus naturelles mais exploitées, elles tendent à regagner du terrain depuis une vingtaine d'années [IFEN, 2002]. La figure 7 montre au sein de quatre pays européens les grandes zones agricoles que sont les Bassins Parisien et Aquitain, La Saxe, la Castille et la Plaine du Pô. L'ouest du continent européen, ayant connu le défrichement le plus ancien (moyen-âge), abrite actuellement l'agriculture la plus intensive



FIG. 6 – Evolution (mondiale) à partir de 1850 de la population (croix), des surfaces cultivées (cercles), irriguées (losanges), des rendements de blé (triangles blancs) et de riz (carrés), de la consommation en engrais azotés (triangles noirs). Source : Evans [1997].

au monde. Les pratiques agricoles optimisées permettent d'atteindre des rendements proches du potentiel dépendant du génôme de l'espèce cultivée. Les facteurs économiques, plus que les facteurs liés au milieu physique, jouent sur l'écart au rendement potentiel en influençant la gestion des moyens de production par les agriculteurs. Cependant il est des conditions climatiques extrêmes auxquelles l'agriculture n'est pas encore adaptée, qui peuvent causer des accidents de productivité.



FIG. 7 - Occupation des sols (100m × 100m) d'après CORINE Land Cover 2000 en a. France,
b. Allemagne, c. Espagne et d. Italie. Les surfaces cultivées apparaissent en jaune et en rose. Source : IFEN [2002]

0.1.4 Incertitudes sur le bilan de carbone européen

Le réchauffement climatique dû aux activités humaines pourrait avoir déjà accru et continuer à accroître le **risque d'occurence de canicules** comme celle qui a marqué l'**été 2003 en Europe** [Stott *et al.*, 2004] (Fig. 8(**a**)). Les températures moyennes estivales (Juin-Août) observées étaient de 5 fois l'écart-type supérieures à la moyenne long-terme, indiquant que cet évènement est extrêmement rare dans les conditions climatiques actuelles [Schär & Jendritzky, 2004] (Fig. 8(**b**)). En revanche, les simulations des températures estivales futures (2071-2100) par les modèles climatiques régionaux placent 2003 près de la moyenne [Beniston, 2004] (Fig. 8(**d**)). Les températures estivales excessives combinées au déficit de précipitation auraient causé en 2003 une réduction de la productivité des écosystèmes européens de 30% [Ciais *et al.*, 2005].

L'impact d'évènements extrêmes sur le bilan de carbone dans le futur sera probablement fort. Il est cependant incertain, non seulement à cause de l'incertitude associée aux projections climatiques mais aussi de l'incertitude autour du bilan de carbone actuel.

Le bilan peut être établi par l'étude des variations des stocks de carbone dans la végétation et le sol. Ces variations de stocks dépendent entre autres des stocks eux-mêmes. Le contenu en carbone stocké dans le sol des surfaces cultivées globales est estimé à $\approx 178GtC$ et à une valeur équivalente dans le sol des prairies tempérées pour une surface légèrement inférieure [Schlesin-



FIG. 8 – Caractéristiques de la canicule de l'été 2003. (a) Anomalie de température (°C) moyenne Juin-Août par rapport à la moyenne 1961-1990. Températures moyennes Juin-Août pour la Suisse de 1864 à 2003, (b) observées, (c) simulées par un modèle de climat régional pour le présent 1961-1990 et (d) pour le futur 2071-2100 sous le scénario $A2^2$ et les conditions aux limites du modèle de circulation générale atmosphérique HadAM3H. Les lignes noires indiquent la distribution de probabilité de la température moyenne estivale pour la période considérée. Source : Schär & Jendritzky [2004], IPCC [2007].

ger, 1997; Post *et al.*, 1982]. Par unité de surface, le sol des surfaces cultivées est plus pauvre que celui des prairies (lui même plus pauvre que celui des forêts). A eux deux, ces types de sols non forestiers concentrent $\approx 25\%$ du carbone global souterrain. Le carbone contenu dans la biomasse végétale s'élève à $\approx 22GtC$ pour les cultures et au double pour les prairies [Schlesinger, 1997; Field *et al.*, 1998]. Ces deux types de végétation à dominante herbacée et annuelle (par opposition à ligneuse et pérenne) se partagent seulement $\approx 12\%$ du carbone global stocké dans la végétation. La productivité annuelle des cultures globales s'élève à 12GtC/an et à trois fois moins pour les prairies. Les cultures sont le type de végétation le plus productif en moyenne globale et participent à hauteur de $\approx 20\%$ à l'absorption nette de CO₂ par les écosystèmes terrestres. Les cultures sont globalement plus productives que les prairies mais stockent moins de carbone dans la biomasse végétale et dans le sol en raison du prélèvement que l'Homme opère sur ces écosystèmes transformés à cette fin.

Une variation des stocks de carbone génère un flux dont le signe, et la nature de source ou de puits qui y est associée, dépend du processus dominant entre respiration et assimilation. Ainsi, la déforestation d'un sol en général riche en carbone génère une source vers l'atmosphère et une reforestation d'un sol en général pauvre un puits. Indépendamment des changements d'utilisation des sols, un écosystème se comporte comme un puits ou comme une source selon les conditions climatiques, car la sensibilité des termes de respiration et de photosynthèse est différente [Bonan, 2002]. La productivité primaire brute est une fonction parabolique de la température et la respiration une fonction croissante. Les extrêmes climatiques auxquels un écosystème n'est pas adapté peuvent donc déséquilibrer le bilan.

La biosphère joue actuellement un rôle de tampon partiel des émissions de CO₂ dûes aux activités humaines en limitant son accumulation dans l'atmosphère mais sa durabilité est incertaine. Les études de Gitz & Ciais [2003], globale, et Zaehle *et al.* [2007], sur l'Europe, montrent qu'il est probable que ce rôle de puits soit réduit dans le futur. Dans le cas de l'Europe, le puits biosphérique des dix dernières années est dû en partie à la progression récente des forêts et en partie aux raisons déjà évoquées en partie 0.1.2. Sur l'ensemble des écosystèmes européens (102 millions d'*ha*) le puits est estimé à $\approx 111 \pm 279TgC/an$. Les cultures sont au sein de l'Europe une source incertaine de $\approx 300 \pm 186TgC/an$ et les prairies un puits relativement plus incertain de $\approx 101 \pm 133TgC/an$ [Janssens *et al.*, 2003].

Rappelons que les surfaces cultivées occupent actuellement selon les sources 30 à 40% de la superficie de l'Europe. Le fonctionnement spécifique (orienté vers la production) et la réponse de ces écosystèmes aux tendances, à la variabilité et aux extrêmes climatiques peut ainsi jouer un rôle important dans le bilan de carbone européen et ses incertitudes. Les pratiques agricoles (calendriers de semis, irrigation, fertilisation...) modulent ce fonctionnement et cette réponse. La biomasse aérienne produite en quantité variable est en partie récoltée et en partie laissée sur place. La biomasse non exportée du système cultural (résidus) peut être enfouie dans le sol ou se décomposer en surface. Le devenir de la matière organique du sol est affecté par le labour, qui, en aérant le sol, peut conduire à une augmentation de son taux de décomposition jusqu'à $\approx 30\%$ [Smith et al., 2000a]. Les flux de carbone échangés en cours de saison de croissance ou après la récolte sont donc très variables selon les choix effectués par les agriculteurs. Plusieurs études se sont intéressées à la question des possibilités de stocker du carbone via des pratiques agricoles adaptées à cet objectif [Smith et al., 2000b; Arrouays et al., 2002; Vleeshouwers & Verhagen, 2002]. Elles ont conduit à des estimations du potentiel d'atténuation de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 que représentent ces pratiques respectivement au Royaume-Uni, en France et en Europe.

En résumé de cette première partie, on peut affirmer que la biosphère joue un rôle important dans le cycle du carbone en tant que réservoir et de par les flux échangés avec le réservoir atmosphérique. La spécificité des écosystèmes cultivés et l'étendue de la surface qu'ils occupent sur les continents, et en particulier l'Europe, poussent à leur prise en compte dans l'étude de la biophère comme composante du système climatique et source de services multiples pour l'Homme. La question générale soulevée par ce contexte agricole et climatique est la suivante : quelle est la contribution des surfaces cultivées à la variabilité spatiale, saisonnière et inter-annuelle des sources et puits de carbone et leur rétro-action sur l'atmosphère ? Le recours aux modèles et leur amélioration constante tente de répondre au besoin de raffiner des estimations sur lesquelles se basent les projections des changements globaux futurs.

0.2 Modélisation de la composante agricole

0.2.1 Modèles de climat, de biosphère et de cultures

La modélisation du climat est apparue dans les années 1950. L'augmentation rapide des moyens informatiques a permis la représentation tri-dimensionnelle des composantes atmosphérique et océanique du système climatique. Or la biosphère joue un rôle actif dans le système climatique, par ses propriétés physiques et ses échanges de matière et d'énergie avec l'atmosphère. Au cours des dernières décennies, les modèles de climat se sont complexifiés afin de décrire plus finement les surfaces continentales et le couplage avec les processus biogeochimiques. Sellers *et al.* [1997] distingue trois générations dans l'évolution des modèles représentant la végétation par ses propriétés biophysiques. Dans les premiers schémas de surface simples, les propriétés de la végétation étaient constantes dans le temps. Dans les plus récents, l'introduction de la photosynthèse modulée par le degré d'ouverture des stomates, permet le couplage avec le cycle du carbone. Les surfaces d'échanges que sont les feuilles sont un élément-clé du couplage entre composantes du système climatique. En parallèle, des modèles de dynamique du carbone dans la végétation et les sols et de dynamique des écosystèmes se sont développés; ils complètent les schémas de surface en en faisant des modèles de biosphère continentale³ (faisant eux-même partie de modèles de système-Terre), comme ORCHIDEE⁴ [Krinner *et al.*, 2005] et IBIS⁵ [Foley *et al.*, 1996]. Les modèles décrivant explicitement les processus d'assimilation du carbone et de son allocation au sein des écosystèmes ont un intérêt propre qui peut être indépendant l'objectif de simulation du climat : celui de permettre l'exploration de la productivité globale en réponse à des reconstructions passées ou à des scénarios futurs de changements climatiques et d'utilisation des sols [DeFries et al., 2007; Pielke et al., 2007].

Jusqu'à récemment, Les modèles de biosphère étaient conçus pour simuler le fonctionnement de la végétation naturelle. Il ne tenaient pas compte des spécificités des écosystèmes gérés par l'Homme tels que les prairies et les cultures. La représentation de ces dernières à l'échelle du globe était simplifiée en types de plantes herbacés, sans réelle contrainte autre que climatique sur leur croissance⁶. C'est sur la base de ce type d'approximation que les études globales visant à quantifier et comparer les effets biophysiques et biogéochimiques des changements d'occupation du sol passés [Brovkin *et al.*, 2004] et futurs [Sitch *et al.*, 2005] ont été réalisées. Dans ces expériences numériques de déforestation, les forêts sont remplacées par des couverts herbacés. Des études régionales montrent qu'une déforestation en zone tempérée (Etats-Unis, Europe) entraîne un refroidissement à cause de la l'augmentation du pouvoir réfléchissant de la surface [Bonan, 1999; De Noblet-Ducoudré *et al.*, 2004, Fig. 1]. Une déforestation en zone tropicale (Amazonie) entraîne, à cause du changement des propriétés aéro-dynamiques de la surface et de la profondeur racinaire, une diminution de l'évaporation (donc de l'humidité disponible pour le recyclage des précipitations), et potentiellement une augmentation de la température de surface [Nobre *et al.*, 1991].

Cependant la végétation cultivée a un fonctionnement propre différent de celui de simples herbacées (phénologie, productivité), et fait l'objet d'une gestion (irrigation, récolte) qui modifie l'état de la surface. Boucher *et al.* [2004] conclut d'une simulation idéalisée que l'irrigation induit *via* la vapeur d'eau transmise à l'atmosphère un forçage radiatif global moyen de +0.03 à +0.1 W/m^2 , participant au réchauffement global. Localement en revanche, il obtient un refroidissement de $-0.8^{\circ}C$ au-dessus des surfaces irriguées. Dans les simulations de Tsvetsinskaya *et al.* [2001] sur les Grandes Plaines des Etats-Unis, les flux de chaleur latente et de chaleur sensible et le partitionnement de l'énergie entre les deux sont modifiés en réponse à différentes paramé-

³On considère ici que les expressions "modèles de biosphère" et "modèles de surfaces continentales" font référence à la même chose, le terme surface ayant une connotation plus physique et le terme biosphère englobant un ensemble de propriétés chimiques et biologiques

⁴ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms

⁵Integrated BIosphere Simulator

⁶ sauf dans certains cas où la productivité est augmentée ou une partie de la productivité naturelle exportée.

trisations de l'indice foliaire et influencent fortement le climat estival. McPherson *et al.* [2004] ont conduit des analyses statistiques sur le blé d'hiver en Oklahoma et des herbacées présentes dans le même environnement, sur la période 1994-2001. Ils ont montré que le blé a un impact considérable sur la température de surface à méso-échelle pendant sa croissance et après sa récolte. La culture serait à l'origine d'une anomalie froide de Novembre à Avril et d'une anomalie chaude de Juin à Août. Ces études suggèrent que les herbacées sont insuffisantes pour représenter la complexité des rétro-actions surface-atmosphère des surfaces cultivées et recommandent la prise en compte des cultures dans les projections pour toutes les zones cultivées du monde. Etant donnée l'importance du feuillage dans la régulation du climat de surface, cette prise en compte passe avant tout par une amélioration de la simulation du cycle saisonnier foliaire dans les modèles climatiques régionaux et globaux [Bonan, 2002].



FIG. 9 – Indice foliaire (m^2/m^2) simulé par ORCHIDEE, par STICS et observé en 1995 à Grignon (a : blé, C3) et en 1996 en Poitou-Charentes (b : maïs, C4). Le jour 1 correspond au 1^{er} Janvier et le jour 365 au 31 Décembre. Source : Gervois et al. [2004].

La phénologie des cultures diffère de celles des herbacées ; elle résulte de la création progressive de variétés répondant aux contraintes économiques. Les variétés de blé semées en hiver, par exemple, ont été créées en complément des variétés de printemps pour permettre une récolte plus précoce (début d'été en France) et un rendement plus élevé grâce à une période d'accumulation de biomasse plus longue. Par rapport aux herbacées, la croissance foliaire est plus rapide et atteint un maximum plus élevé. Les dates de semis, de récolte et le choix des variétés, et non pas seulement les conditions pédo-climatiques, contraignent le début, la fin et la durée de la saison de croissance. L'évolution de l'indice foliaire est plus abrupte car le peuplement végétal est homogène et monospécifique, l'hétérogénéité est plus faible que dans le milieu naturel. La figure 9, tirée de Gervois *et al.* [2004], illustre ces différences de phénologie entre herbacées et cultures simulées respectivement par un modèle de biosphère (ORCHIDEE, [Krinner *et al.*, 2005]) et par un modèle de culture (STICS, [Brisson *et al.*, 2002]), pour les deux types photosynthétiques C3 et C4. Le modèle de culture reproduit bien le cycle foliaire observé sur ces sites et nombre d'autres où il a été validé.

Parallèlement à leur exploitation par l'Homme sur une étendue croissante, les cultures ont fait l'objet de recherches depuis plusieurs siècles. Le développement des moyens informatiques a permis l'essor des modèles de cultures, utilisés à des fins de prédiction des rendements et des transferts de polluants dans l'environnement, ou pour répondre à des questions particulières pour une culture donnée dans un milieu donné. Devant la multitude des modèles de cultures très spécifiques developpés dans les années 1980 et 1990, il est apparu la nécessité d'outils plus génériques. Sinclair & Seligman [1996, 2000] recommandent de définir des objectifs scientifiques clairs, un domaine de validité précis et de pointer sur les aspects innovants par rapport aux modèles existants. EPIC⁷ [Williams *et al.*, 1984] est le premier modèle de culture générique, suivi par WOFOST⁸ [Vandiepen *et al.*, 1989] et STICS⁹. Ces modèles traitant une grande gamme d'espèces cultivées n'ont toutefois pas été conçus pour des applications à grande échelle.

L'intérêt de travailler avec un modèle de surfaces continentales intégrant une représentation des écosystèmes agricoles, plutôt que d'envisager une application spatiale d'un modèle de cultures seul, réside dans la possibilité de calculer des bilans régionaux de carbone et d'eau cohérents avec ceux effectués pour les écosystèmes non agricoles. A présent, on souhaite en effet modéliser conjointement le fonctionnement des écosystèmes naturels et anthropisés. Avec un modèle de surfaces continentales, il devient possible de simuler à grande échelle l'évolution de ces bilans en fonction du changement d'utilisation des sols. L'effet direct de ce changement sur le climat (biophysique) et/ou via l'émission de CO₂ (biogéochimique) peut ainsi être quantifié.

0.2.2 Etat de l'art de la représentation des cultures dans un modèle de biosphère

Plusieurs équipes de recherche ont entrepris de prendre en compte les spécificités des écosystèmes cultivés. Le problème a été abordé avec des priorités différentes à court-terme (une culture, une région ou un processus particulier) selon les objectifs d'application et les capacités des outils à disposition. Scholze *et al.* [2005] (en Annexe A) recense les études contemporaines à cette thèse, suite à la première réunion internationale entre modélisateurs de la biosphère et agronomes, financée par le programme QUEST¹⁰ du NERC¹¹. Mon travail se situe dans ce contexte de modélisation parmi les cinq approches qui ont été envisagées. Aucune des approches n'est à l'heure actuelle capable de simuler globalement le fonctionnement physiologique, la gestion et l'évolution des surfaces cultivées à la fois en bouclant le bilan de carbone et en prenant en compte les processus hydriques et énergétiques qui permettent le couplage interactif avec la circulation atmosphérique. Le tableau 1 récapitule les développements en cours au sein des groupes allemands, français, anglais et américains. Je parlerai par la suite plus particulièrement de deux de ces approches auxquelles j'ai participé.

Le tableau 1 ne prétend pas être exhaustif dans la liste des développements et applications liées à chaque approche mais tente de souligner les particularités de chacune; pour une revue récente et complète, voir la synthèse de Arneth *et al.* [in prep.]. En général les approches ont en commun le fait de vouloir garder autant que possible la modélisation des processus du modèle de surfaces continentales inchangée (hydrologie, photosynthèse) et introduire des formulations nouvelles pour la phénologie des cultures, l'allocation du carbone aux organes et la réponse aux pratiques agricoles. Les quatre cultures principales au monde sont en général représentées (blé, maïs, soja et riz). La question du nombre de types à représenter globalement et du niveau de détail optimal est encore ouverte et dépend du processus étudié.

Une approche basée sur une collaboration entre le $LSCE^{12}$ et l'INRA¹³ d'Avignon a démarré avant ma thèse [Gervois *et al.*, 2004], tandis que je développais en étroite collaboration avec

⁷Erosion Productivity Impact Calculator

⁸WOrld center for FOod Study Together

⁹Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard

¹⁰Quantifying and Understanding the Earth SysTem

¹¹U.K. Natural Environment Research Coucil

¹²Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

 $^{^{13}}$ Institut National de Recherche Agronomique

TAB. 1 – Approches actuelles de modélisation de la surface continentale intégrant une représentation des cultures.

	LPJmL	ORCHIDEE- STICS	AGRO- IBIS	GLAM- MOSES	DAYCENT
Modèle biosphère-cultures	Bondeau <i>et al.</i> [2007]	Smithetal.[soumis]Gervoisetal.[2004]	Kucharik & Brye [2003]	Osborne <i>et al.</i> [2007]	Stehfest et al. [2007]
Modèle de	LPJ	ORCHIDEE	IBIS		CENTURY
biosphère d'origine	Sitch <i>et al.</i> [2003]	Krinner <i>et al.</i> [2005]	Foley <i>et al.</i> [1996]		Parton <i>et al.</i> [1998]
Modèle de	SWAT & SWIM	STICS	EPIC	GLAM	
cultures	Arnold [1994] Krysanova et al. [2005] [2005]	Brisson <i>et al.</i> [2002]	Williams et al. [1984]	Challinor et al. [2004]	
Types de cultures considérés	10CFT tempé-réset tropicaux+2prairies fau-chées ou pâturées	3 PFT agri. (blé, maïs & soja)	blé, maïs & soja	arachide	blé, maïs, soja & riz
Echelle d'applica- tion principale	global	Europe	Amérique du Nord	Inde	global
Particularités	bilan C & changement occupation sols	biogéochimique & biophysique	lessivage & export d'azote	interaction climat	

Alberte Bondeau une approche très différente, au PIK¹⁴ (Allemagne) à partir du modèle LPJ^{15} (Bondeau *et al.* [2007], en Annexe B).

• Parmi les approches, LPJmL¹⁶ intègre le plus grand nombre de types de cultures, pour une application à l'échelle globale. Au sein d'un même Type Fonctionnel de Culture" (CFT), par exemple les "céréales tempérées" qui sont cultivées dans une large gamme de latitudes, j'ai introduit un gradient de phénologies allant du type "hiver" au type "printemps" : faute de disposer de données globales sur les pratiques culturales, la date de semis est calculée en fonction du climat moyen des vingt dernières années en chaque point de grille. Les paramètres de la phénologie du CFT sont ensuite adaptés à cette date de semis, pour prendre en compte implicitement l'optimisation faite par les agriculteurs à leur environnement (Bondeau *et al.* [2007, p682-687], en Annexe B). Suite à la récolte d'une culture, de riz par exemple, LPJmL est capable de simuler un deuxième cycle au cours de la même année climatique. Des simulations transitoires sur le $XX^{ème}$ siècle avec changements d'utilisation des sols ont été réalisées pour analyser les émissions de CO_2 dûes aux conversions. C'est au sein d'un seul et même modèle que LPJmL représente les cultures, bien que la mise en équation de leur fonctionnement s'inspire des modèles SWAT¹⁷ [Arnold, 1994] et SWIM¹⁸ [Krysanova *et al.*, 2005]. La représentation mosaïque de la végétation permet de faire co-exister une vingtaine de types au sein de chaque maille.

• L'approche ORCHIDEE-STICS est basée sur le même concept de mosaïque et représente trois types de cultures tempérées (deux types à l'issue de la thèse dont la mienne prend le relais) pour une application à l'échelle Européenne. Elle vise à intégrer une partie des connaissances agronomiques inclues dans les formalismes du modèle STICS. Sans passer par la création d'un nouveau module de "surface continentale gérée" comme dans LPJmL, ORCHIDEE assimile les variables-clés simulées par STICS pour corriger des variables mal simulées pour les cultures (ex. Indice foliaire) ou prendre en compte implicitement des processus non modélisés (ex. cycle de l'azote). ORCHIDEE, dans sa version standard, est intégré au modèle couplé de climat de l'IPSL¹⁹. Il sera donc possible à terme, dans le cadre de simulations climatiques, de bénéficier des développements de la composante agricole.

La première étape d'évaluation des différentes approches a en général consisté en une comparaison des flux d'eau et de CO_2 simulés aux flux mesurés sur les quelques sites agricoles du réseau mondial FluxNet [Baldocchi *et al.*, 2001]. La figure 10 tirée de Gervois *et al.* [2004] présente l'évaluation du flux net de CO_2 et de l'évapotranspiration sur deux sites américains, l'un de blé et l'autre de maïs. Cette évaluation montre un bien meilleur phasage des flux saisonniers simulés par ORCHIDEE-STICS avec les mesures, que celui des flux simulés par ORCHIDEE seul. Le même type d'évaluation a été réalisée avec LPJmL sur le flux net de CO_2 et ses composantes (Bondeau *et al.* [2007, Fig. 12 p694], en Annexe B). La bonne reproduction des rendements enregistrés par la FAO²⁰ ou dans d'autres statistiques nationales est également un objectif commun à la plupart des approches.

Positionnement de la thèse Dans un contexte où aucun modèle de biosphère et/ou de climat intégrant l'agriculture n'était opérationnel à l'échelle globale, cette thèse présente une des façons de s'y atteler : par couplage entre deux modèles complémentaires, travail qui a été initié avant et poursuivi pendant ma thèse. Mon travail focalise, pour les premières évaluations et applications spatiales, sur les zones cultivées qui nous entourent (Fig. 7) et pour la représentation desquelles

 $^{^{14}\}operatorname{Potsdam}$ Institute for Climate Impact Research

 $^{^{15} {\}rm Lund}\text{-} {\rm Potsdam}\text{-} {\rm Jena}$

¹⁶LPJ managed Land

 $^{^{17}\}mathrm{Soil}$ Water Assessment Tool

¹⁸Soil Water Integrated Management

 $^{^{19} {\}rm Institut}$ Pierre Simon Laplace

 $^{^{\}rm 20}{\rm Food}$ and Agricultural Organisation



FIG. 10 – Moyennes glissantes sur 5 jours du flux net de carbone $(a,b:gC/m^2/j)$ simulé par ORCHIDEE (bleu), ORCHIDEE-STICS (rouge) et mesuré (noir) sur les 2 sites de la figure 9. Idem pour l'évapotranspiration (c,d:mm/j). Source : Gervois et al. [2004].

le modèle de cultures générique STICS s'avère être un outil précieux.

0.2.3 Objectifs de la modélisation régionale des surfaces cultivées

Pour les raisons résumées ci-dessous, cette thèse s'intéresse principalement aux surfaces cultivées européennes :

- l'étendue de la surface qu'elles occupent au sein de la biosphère terrestre, gérée de manière particulièrement intensive en Europe de l'Ouest
- la disponibilité des données statistiques et de terrain relativement à d'autres zones cultivées
- l'importance de leur rôle modulateur des variations saisonnières et inter-annuelles des flux d'eau, d'énergie et de carbone échangés avec l'atmosphère
- la simplification dont elles faisaient précédemment l'objet dans les modèles de surfaces continentales

Dans cette thèse, on centre l'analyse sur le fonctionnement des surfaces cultivées en réponse à la variabilité climatique inter-annuelle récente (sans rétro-action avec l'atmosphère) et leur effet sur le cycle du carbone avec une attention particulière pour les années extrêmes. On n'étudiera pas la réponse aux tendances dans l'extension des surfaces cultivées et dans les pratiques agricoles. La modélisation régionale des cultures entreprise ici a pour objectif à court-terme de :

- quantifier l'apport de la nouvelle composante agricole par rapport à la version du modèle de biosphère sans cultures, et de
- participer aux estimations du bilan de carbone actuel des écosystèmes européens (dans le cadre du projet CarboEurope²¹), à la compréhension de leurs composantes, et si possible à la réduction de leur incertitude.

Le premier volet a constitué la plus grande partie de mon travail de thèse. Celui-ci s'attache à confronter à des grandeurs observées disponibles à l'échelle de l'Europe les résultats des simulations régionales du fonctionnement des surface cultivées, en vue d'en évaluer le réalisme. Les grandeurs observées sont de résolution spatiale et temporelle variable en fonction de leur nature.

- Les données satellitaires donnent accès à intervalle régulier au cycle saisonnier et à la distribution spatiale des grands types d'écosystèmes.
- Les statistiques de rendement renseignent sur la productivité intégrée sur la saison de croissance annuelle par culture en moyenne par pays ou région (il existe des inventaires équivalents pour les autres écosytèmes, ex. forestiers).
- Les mesures atmosphériques de concentration en CO₂ fournissent une information qui intègre le mélange du CO₂ dans l'atmosphère à partir des différents flux de surface (sources continentale et océanique). Leur exploitation nécessite une désagrégation de l'information.

A chaque étape de l'évaluation d'ORCHIDEE-STICS un traitement faisant appel à la littérature (composition de la matière végétale) ou à des modèles (traitement des données de télédétection, méthodes inverses) a été nécessaire pour rendre les grandeurs simulées et observées comparables. Une partie de ces traitement a été réalisée en étroite collaboration avec les équipes "Télédétection" et "Inversions" du LSCE.

J'ai réalisé puis comparé entre elles, et aux observations, plusieurs simulations européennes avec ORCHIDEE incluant ou non la nouvelle composante agricole (STICS). Une comparaison supplémentaire entre simulations d'ORCHIDEE-STICS avec apports d'eau optimaux ou nuls permet de mesurer l'effet de l'irrigation et de définir une fourchette de résultats, en l'absence de données réelles à l'échelle de l'Europe. La comparaison aux observations a été réalisée en considérant plusieurs jeux de données pour chaque variable évaluée, dans l'espoir de mesurer la robustesse des interprétations sur l'amélioration attendue grâce à la prise en compte des surfaces cultivées.

 $^{^{21}}$ Projet européen visant à estimer le bilan de carbone à l'échelle de l'Europe au moyen de différentes approches de modélisation et d'intégration de données

Dans le contexte de la question générale posée en fin de la première partie de cette introduction (0.1), cette thèse tente d'apporter des réponses aux questions méthodologiques et scientifiques qui sont détaillées dans le plan qui suit. D'un côté on dresse un bilan du potentiel et des limites de l'approche vis-à-vis des objectifs énoncés. De l'autre, on propose quelques applications précises pour mieux comprendre et quantifier la contribution des cultures à la dynamique du carbone dans la biosphère.

0.2.4 Organisation de la thèse

Le chapitre 1 présente les **caractéristiques méthodologiques de l'approche ORCHIDEE-STICS**. Dans un premier temps, les deux modèles sont décrits, ainsi que les adaptations réalisées en vue de simulations européennes associant les deux. Le fonctionnement des surfaces cultivées représentées dans ORCHIDEE *via* STICS est décrit dans un deuxième temps. Ce travail est soustendu par l'hypothèse principale qu'une simulation correcte de la phénologie est cruciale pour l'estimation des flux d'eau, d'énergie et de CO_2 échangés entre la végétation et l'atmosphère, dont les feuilles sont le support. La phénologie définit la durée ainsi que les conditions d'accumulation de biomasse selon la position du cycle dans l'année. La phénologie détermine la saisonnalité du flux net de carbone des écosystèmes vers l'atmosphère, car les flux bruts d'assimilation photosynthétique (puits) et de respiration de la végétation et du sol (source) ne sont pas phasés. Les facteurs que sont l'irrigation et la fertilisation (calculées par STICS) viennent moduler la productivité d'ORCHIDEE. Enfin, on décrit les simulations réalisées dans un but d'évaluation du modèle en conditions actuelles et de son application à l'étude d'années particulières récentes.

Un article, soumis à Global Biocheochemical Cycles (avril 2008) fait ressortir les points importants du premier chapitre méthodologique et introduit les trois chapitres suivants. Il donne une vision générale de la thèse en traitant de l'**évaluation**, à l'échelle européenne sur les trois dernières décennies, des résultats d'ORCHIDEE-STICS vis-à-vis de données tirées d'observations à résolutions spatiale et temporelle variées. L'évaluation porte successivement sur le cycle saisonnier foliaire, la productivité primaire nette des cultures en réponse à la variabilité inter-annuelle du climat et l'anomalie de flux net de carbone, source vers l'atmosphère en 2003. Le réalisme des simulations européennes avec ORCHIDEE-STICS et les limites de l'approche sont discutés sur la base de ces résultats.

Le chapitre 2 présente tout d'abord l'obtention, à partir des grandeurs physiques mesurées par les instruments à bord de **satellites**, d'indices de végétation comparables à un indice foliaire. Puis, il approfondit l'évaluation de la **phénologie** commencée dans l'article, en faisant intervenir plusieurs jeux de données, traités plus finement (par exemple extraction de la contribution des cultures au signal observé par satellite), ainsi que plusieurs diagnostics. Cette façon de procéder donne en quelque sorte une mesure de l'incertitude dont nos conclusions sont assorties.

- Qu'apporte la prise en compte de la phénologie des cultures à la simulation de l'indice foliaire par un modèle de biosphère?
- Quelles pistes l'information contenue dans les données satellitaires donne-t-elle pour améliorer la représentation des différents types de phénologie ("hiver", "printemps") et leur combinaison au sein de chaque maille de la carte d'occupation du sol?

Le chapitre 3 explique d'abord *via* quelles conversions la **productivité** simulée et les rendements observés peuvent être comparés. Ensuite, les performances d'ORCHIDEE-STICS sont discutées. Enfin on utilise le modèle pour analyser la réponse différentielle des cultures à deux évènements climatiques extrêmes.

- La productivité moyenne simulée par ORCHIDEE-STICS sur la base d'une combinaison de PFT agricoles est-elle représentative de l'ensemble de la productivité agricole européenne ?
- La variabilité inter-annuelle de la productivité agricole enregistrée dans les statistiques de rendements est-elle bien reproduite par le modèle ??

• Quels sont d'après le modèle les mécanismes responsables de la chute de productivité agricole observée et simulée pour les années de sécheresse et canicule de 1976 et 2003 ?

Le chapitre 4 commence par présenter les **approches atmosphériques inverses**, consistant à utiliser un modèle de transport pour reproduire une distribution spatio-temporelle du flux net de CO_2 de surface à partir des concentrations mesurées en un réseau de stations atmosphériques, et de contraintes pour l'optimisation.

- Les estimations du **flux net européen de CO**₂ par modélisation de type "bottom-up" (ORCHIDEE-STICS) et "top-down" (inversions atmosphériques) convergent-elles sur la dernière décennie, en particulier pour la source anormale détectée en 2003 ?
- A quelle échelle spatiale et temporelle l'information apportée par les inversions atmosphériques peut-elle être considérée comme fiable pour confirmer l'apport de la composante agricole dans les simulations ORCHIDEE-STICS ?
- Comment se décompose spatialement et saisonnièrement l'anomalie 2003 de flux net de CO_2 simulée, entre productivité et respiration et entre végétation agricole et naturelle?

Enfin, on utilise ORCHIDEE-STICS pour interpréter l'excès de CO_2 dans l'atmosphère (par rapport à la teneur moyenne récente) attribué à un dégagement de CO_2 par les écosystèmes européens en 2003. Les résultats sont replacés dans le contexte des estimations de nature variée que le projet CarboEurope vise à intégrer.

A la fin de chacun des trois chapitres de résultats, on donne une synthèse, dont seules les grandes lignes seront reprises en conclusion générale. La partie perspectives ouvre sur les études qui pourront être menées à l'issue de ce travail.

Chapitre 1

Les surfaces cultivées dans le modèle couplé ORCHIDEE-STICS : description et adaptation pour des simulations européennes

Sommaire

1.1 H	Histo	rique d'ORCHIDEE-STICS et poursuite de son développement 2	23
1.1	1.1	Complémentarité d'ORCHIDEE et de STICS	23
		1.1.1.1 La biosphère simulée par ORCHIDEE	23
		1.1.1.2 Les cultures simulées par STICS	26
		1.1.1.3 Intérêt d'un couplage	28
1.1	1.2	Consolidation d'ORCHIDEE-STICS en une plate-forme "client-serveur"	29
1.2 F	Fonct	tionnement des surfaces cultivées dans ORCHIDEE-STICS 3	34
1.2	2.1	Développement du couvert et propriétés bio-physiques de la surface	34
		1.2.1.1 Cycle saisonnier foliaire	34
		Phénologie : début et fin de la saison de croissance	34
		$ Evolution de l'indice foliaire LAI \dots \dots$	36
		Phénologie et LAI de référence	37
		1.2.1.2 Rôle du LAI dans les caratéristiques de surface	39
		Hauteur de végétation	39
		Interception du rayonnement	40
1.2	2.2	Productivité et bilan de carbone	41
		1.2.2.1 Photosynthèse et conductance stomatique	41
		Processus d'assimilation à l'échelle de la feuille 4	41
		Intégration verticale à l'échelle du couvert	44
		1.2.2.2 Respiration autotrophe et devenir des assimilats $\ldots \ldots \ldots \ldots$	45
		Les respirations de maintenance et de croissance	45
		Répartition de la biomasse allouable entre compartiments \ldots . 4	45
		Récolte et transfert de carbone vers la litière \ldots \ldots \ldots 4	46
		1.2.2.3 Respiration hétérotrophe et flux net de CO_2	47
1.3 S	Simu	lations à l'échelle de l'Europe	50
1.3	3.1	Forçages atmosphériques	50
		1.3.1.1 Climat	50
		1.3.1.2 CO ₂	50
1.3	3.2	Paramètres du sol	51
1.3	3.3	Carte de végétation	51
		$1.3.3.1 \qquad \text{Obtention des fractions de surfaces agricole totale et naturelles} \Xi$	51
		1.3.3.2 Agrégation de 19 catégories de cultures en 3 PFT agricoles	52

	1.3.3.3	Ajustement des fractions relatives par PFT au sein de la frac-	
		tion agricole	í
1.3.4	Pratique	$_3~{ m agricoles}$	3
1.3.5	Jeux de	${ m simulations}$ et échelle spatio-temporelle	5

L'introduction a mis en relief les spécificités des écosystèmes cultivés, bien prises en compte dans les modèles de culture. Elle a en parallèle "dénoncé" leur représentation en général très simplifiée dans les modèles de biosphère.

Ce premier chapitre présente dans un premier temps (partie 1.1) la méthode de couplage de deux modèles complémentaires ORCHIDEE et STICS. Le travail initié par Gervois *et al.* [2004] et De Noblet-Ducoudré *et al.* [2004] a été complété pour permettre la poursuite d'analyses et de l'évaluation du modèle couplé, cette fois à l'échelle inter-annuelle et régionale).

Le fonctionnement des surfaces cultivées telles que représentées dans l'approche ORCHIDEE-STICS est décrit dans un deuxième temps (partie 1.2), en insistant sur les formalismes décrivant les processus qui sont évalués au fil des chapitres (cycle saisonnier foliaire, productivité des cultures et bilan de carbone).

Enfin, les différentes simulations réalisées ainsi que la préparation des forçages et paramètres nécessaires sont décrites en partie 1.3.

1.1 Historique d'ORCHIDEE-STICS et poursuite de son développement

1.1.1 Complémentarité d'ORCHIDEE et de STICS

1.1.1.1 La biosphère simulée par ORCHIDEE

 $ORCHIDEE^1$ est un modèle numérique de la biosphère terrestre qui simule le fonctionnement de la végétation naturelle et des sols ainsi que leurs échanges avec l'atmosphère, à des échelles de temps allant de la demie-heure au millier d'années. Il fait partie des modèles dits "de troisième génération" d'après Sellers *et al.* [1997] et repose sur une modélisation inter-disciplinaire en trois modules couplés :

- Le module de surface SECHIBA² [Ducoudré et al., 1993] a été le point de départ du développement d'ORCHIDEE. Ce schéma de surface³ a été mis au point pour prendre en compte les processus de surface dans le Modèle de Circulation Générale atmosphérique (aGCM) LMDz⁴, lui-même étant une composante du modèle climatique couplé de l'IPSL⁵. SECHIBA permet le calcul des différentes composantes des bilans hydrique et énergétique entre le sol, la végétation et les basses couches de l'atmosphère. Il résout au pas de temps de 30 minutes le cycle diurne des processus bio-physiques rapides comme les flux turbulents (chaleur sensible, chaleur latente), l'accumulation de chaleur dans le sol et l'évolution des réservoirs d'eau à l'échelle d'une maille du modèle. Le calcul de la photosynthèse (Farquhar et al. [1980] pour les plantes en C3 et Collatz et al. [1992] pour les plantes en C4) et son interaction avec le bilan hydrique via la conductance stomatique [Ball et al., 1987] ont été ajoutés, faisant ainsi le lien entre SECHIBA et le module de dynamique du carbone STOMATE.
- Le module bio-géo-chimique STOMATE⁶ simule la dynamique saisonnière des réservoirs de carbone que sont la végétation et le sol. Ces processus plus lents sont décrit au pas de temps de la journée. Néanmoins, pour simuler le cycle diurne du flux net de CO₂ (NEP⁷ ou NEE⁸ selon la convention de signe utilisée), les termes de la respiration sont calculés à la fréquence de l'heure et soustraits de celui de l'assimilation brute par photosynthèse (GPP⁹) calculé par SECHIBA. La formulation de la phénologie inclut une modélisation du début du cycle saisonnier et de la sénescence de la végétation [Botta et al., 2000; Krinner et al., 2005]. L'allocation des produits de la photosynthèse repose sur Friedlingstein et al. [1999] et la respiration autotrophe sur Ruimy et al. [1996]. Les processus de conversion ("turnover") entre réservoirs de carbone ou différentes classes d'âge de feuilles ont été décrits par Sitch et al. [2003] et Krinner et al. [2005]. La décomposition de la litière et la dynamique du carbone dans le sol ont été adaptées du modèle CENTURY [Parton et al., 1988].
- Le module écologique LPJ¹⁰ provient du Modèle Dynamique Global de Végétation (DGVM) du même nom [Sitch *et al.*, 2003], dont a été reprise la formulation de la dynamique de la végétation naturelle. Celle-ci inclut la compétition entre grands Types Fonctionnels de Plantes (PFT), leur mortalité naturelle et la perturbation de leur équilibre par les feux. Ces processus sont simulés au pas de temps de l'année. LPJ dérive lui-même du

¹ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms

 $^{^2 {\}rm Sch\acute{e}matisation}$ des Echanges Hydriques à l'Interface Biosphère-Atmosphère

 $^{^3 \}mathrm{ou}~\mathrm{SVAT}$: Soil-Vegetation-Atmosphere transfer Scheme

⁴Laboratoire de Météorologie Dynamique (Paris), mode zoomé

⁵Institut Pierre-Simon Laplace, France

⁶Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems

⁷Net Ecosystem Productivity

⁸Net Ecosystem Exchange

⁹Gross Primary Productivity

¹⁰Lund-Potsdam-Jena

modèle bio-géographique BIOME [Prentice *et al.*, 1992], conçu pour simuler la répartition spatiale de la végétation en fonction des conditions climatiques à l'équilibre. LPJ a été désactivé dans notre étude car celle-ci n'a pas porté sur la végétation naturelle et son évolution mais sur la végétation "anthropique" (agricole, exploitée par l'Homme) et son fonctionnement en conditions stables (répartition prescrite des PFT).

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

- structurel ; les arbres (ligneux) sont distingués des prairies (herbacées naturelles) et cultures (herbacées agricoles)
- architectural; les arbres ont des feuilles¹¹ (feuillus) ou des aiguilles (conifères)
- phénologique ; les arbres perdent leurs feuilles¹² (caducifoliée) ou les gardent pendant l'hiver (sempervirente)
- bioclimatique ; les aires de croissance des arbres sont dominées par un climat moyen boréal, tempéré ou tropical
- photosynthétique; la photosynthèse des herbacées est de type C3 ou C4 (efficience d'utilisation de l'eau et du CO_2 plus élevée)

Un biome dans ORCHIDEE devient ainsi une combinaison des **12 PFT** et du sol nu permanent dans des proportions particulières. Au sein d'une maille élémentaire du modèle, tous les PFT peuvent a priori co-exister. En mode statique (LPJ désactivé), c'est la carte de végétation qui prescrit les fractions de surface couverte par chacun des PFT. Les PFT "cultures en C3" et "C4", que nous nommerons par la suite "pseudo-cultures" ou "herbacées pseudo-agricoles" (pour faire la différence avec les cultures dont la représentation aura été modifiée via STICS), sont dans la version standard d'ORCHIDEE de simples herbacées dont la croissance est pilotée uniquement par les conditions climatiques, sans gestion par l'Homme. Leur différence avec les PFT "herbacées naturelles" réside dans le maximum d'indice foliaire (LAI¹³) et le rendement de la photosynthèse, qui ont été augmentés pour tenir compte implicitement des fertilisants et de la séléction génétique.

Notons que dans la version du modèle que nous avons utilisée et développée, le cycle des nutriments, comme l'azote, n'est pas explicitement simulé. Concernant l'hydrologie du sol, c'est la version "double bucket" [Choisnel, 1977; Ducoudré *et al.*, 1993; de Rosnay & Polcher, 1998] à deux réservoirs (un de surface indépendant par PFT et un réservoir profond commun à tous les PFT) qui a été utilisée. La taille de chacun des réservoirs dépend des apports d'eau (précipitations, fonte des neiges) et des pertes (évapo-transpiration, ruissellement). La profondeur utile moyenne est prescrite à 2m et la réserve utile à 300mm (150mm/m).

La figure 1.1 récapitule schématiquement le fonctionnement d'ORCHIDEE avec ses interactions entre modules. L'information échangée avec l'atmosphère passe par le schéma de surface SECHIBA. Il s'agit des conditions atmosphériques dans un sens et des flux de surface dans l'autre. Les conditions atmosphériques sont, dans la présente étude, prescrites¹⁴ et non pas issues¹⁵ d'un aGCM comme LMDz. Les flux de surface (flux turbulents : flux de chaleur sensible (H) et de chaleur latente (LE); flux radiatifs de courte longueur d'onde (SW) et grande longueur d'onde (LW); flux de $C0_2$) peuvent, en mode couplé surface-atmosphère, devenir des variables d'entrées au aGCM. Ces flux de surface sont calculés à l'échelle de la maille. SECHIBA trans-

¹¹au sens strict

¹²au sens large

¹³Leaf Specific Area

¹⁴ configuration d'ORCHIDEE "off-line" ou forcée

 $^{^{15}\}mathrm{configuration}$ d'ORCHIDEE "on-line" ou couplée



FIG. 1.1 Structure générale du modèle ORCHIDEE, inspirée de Krinner et al. [2005], décrivant les principaux processus simulés par les modules SECHIBA et STOMATE et leurs pas de temps. Les trois réservoirs de carbone de la végétation et du sol ainsi que leur compartimentation figurent dans les boîtes rectangulaires de STOMATE. Les flèches pleines représentent les flux de carbone. Les petites au sein des compartiments de biomasse et de carbone du sol correspondent respectivement à la translocation en début de cycle et au transfert de matière organique d'un réservoir à temps de dégradation court à un réservoir à temps de dégradation plus long. Sont aussi représentés les forçages atmosphériques, les variables de sortie principaleset les variables échangées entre les deux modules (flèches pointillées). Le module de dynamique de la végétation (LPJ) n'apparaît pas sur cette figure ; il a été désactivé dans notre étude.

met à STOMATE principalement la GPP, la respiration de croissance associée, et les profils de température et d'humidité dans le sol, calculés à partir des données de forçage. L'assimilation (GPP) est pilotée par la phénologie propre à chaque PFT. STOMATE alloue ensuite la biomasse aux réservoirs de carbone et calcule les autres termes de la respiration. Il retourne à SECHIBA le LAI (pour chaque PFT), résultant de la conversion des assimilats en surface foliaire. Le LAI, dont dépendent l'albédo¹⁶ et la rugosité¹⁷, représente l'état de la végétation et rétro-agit sur les bilans de surface et la capacité photosynthétique du couvert. Le LAI est défini ici comme la surface foliaire verte (une seule face) totale d'un PFT, rapportée à la surface de sol occupée par le PFT ; il peut cependant avoir un grand nombre de définitions différentes [Asner *et al.*, 2003].

1.1.1.2 Les cultures simulées par STICS

STICS¹⁸ [Brisson *et al.*, 1998, 2002, 2003] est un modèle de croissance des cultures appartenant à la catégorie de modèles génériques et agro-environnementaux, comme le modèle EPIC [Williams et al., 1984] puis CROPSYST [Stockle et al., 1994]. Il est destiné à simuler à l'échelle de la parcelle i) la production agricole en quantité et qualité (en cela semblable aux modèles de l'école américaine [Whisler et al., 1986; Ritchie & Otter, 1985; McCown et al., 1996; Boote et al., 1998]), ainsi que ii) l'évolution du milieu de culture (contenu en eau et azote du sol) sous l'effet de la culture. Cette production répond aux contraintes techniques (calendrier agricole et spécificités variétales) et environnementales (pédo-climatiques) et vise à satisfaire des objectifs économiques de rentabilité. Le modèle a été initialement développé et validé pour le blé et le maïs mais ses formalismes ont été adaptés à d'autres cultures tempérées comme le soja, la betterave, le tournesol, le colza, la luzerne, la tomate, la vigne... Son adaptation à certaines cultures tropicales (banane, canne à sucre) est en cours d'évaluation. La plupart des formalismes sont génériques mais des options de calcul spécifiques faisant appel à différentes parties du code source peuvent être activées selon le type de culture : à croissance déterminée/indéterminée¹⁹. annuelles/pérennes... Il en est de même selon la nature des pratiques auxquelles la culture doit répondre : cultures en rang (arbres fruitiers) ou non, mode de récolte... Le reste des paramètres physiologiques et techniques spécifiques à chaque espèce et variété ainsi que les paramètres du sol interviennent directement dans les équations.

Le modèle STICS est moins mécaniste qu'ORCHIDEE ; il fonctionne au pas de temps journalier. Il ne simule pas explicitement les processus de photosynthèse et de respiration, comme dans les travaux de de Wit *et al.* [1970], mais rend compte de l'accroissement de la biomasse de la végétation selon une formulation de type RUE (Efficience d'Utilisation du Rayonnement solaire), adaptée de Stockle [1992]. Cette formulation repose sur l'approche de Monteith [1972] et a été affinée par l'introduction des effets de la température et des stress hydriques et azotés par Amir & Sinclair [1991]. La RUE permet la conversion de l'énergie lumineuse en tissus végétaux aériens²⁰ via deux efficiences : l'efficience $faPAR^{21}$ d'interception par le couvert du rayonnement²² incident (PAR_i) utile à la photosynthèse ou et l'efficience ϵ_c d'utilisation du PAR absorbé (PAR_a). Le faPAR dépend du LAI selon une fonction exponentielle (loi de Beer-Lambert [Monsi & Saeki, 1953]), où intervient le coefficient d'extinction du rayonnement (k). Ce coefficient est en général d'autant plus faible que les feuilles sont érigées et laissent pénétrer le rayonnement profondément dans la canopée jusqu'au sol. L'incrément potentiel journalier de LAI est calculé à partir d'un indice thermique²³. Le nombre de degrés-jours requis pour le passage des différents stades

¹⁶fraction de rayonnement incident de courte longueur d'onde qui est réfléchie par la surface (végétation et sol) ¹⁷longueur caractéristique d'une surface qui intervient dans le calcul du coefficient d'échange entre la surface et l'atmosphère

¹⁸Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard

¹⁹ chevauchement des phases de développement végétatif et reproducteur

²⁰au-dessus du sol, par opposition à souterrains

²¹ absorbed fraction of Photosynthetically Active Radiation

²² en ondes courtes, soit dans le visible

²³ la somme d'unités de chaleur supérieures à une température de base cumulées depuis la date de semis ou le



FIG. 1.2 Schéma général du modèle STICS [Source : Brisson, HDR]. Les organes récoltés contiennent du carbone (matière provenant de la conversion de l'énergie lumineuse et son allocation vers les grains) et de l'azote (provenant du bilan azoté entre l'offre du sol et par la fertilisation et les besoins de la plante). Le stade de développement ainsi que les stress hydriques et azotés influencent les différentes étapes de la production et les règles de répartition de cette matière.

phénologiques fait partie des paramètres variétaux [Brisson & Delecolle, 1992]. La conversion du rayonnement absorbé en biomasse est également pilotée par la phénologie car ϵ_c varie en fonction du stade.

Les modèles de culture, dont l'ancêtre, à vocation écophysiologique, vient de l'école hollandaise [de Wit, 1978], sont classiquement construits en 3 grands modules : phénologie (ou développement), assimilation (ou conversion puis répartition), contraintes (ou stress) (Fig. 1.2). La production photosynthétique, obtenue comme cela a été brièvement décrit dans le paragraphe précédent, est allouée aux différents organes avec des priorités variables dans le temps [Weir *et al.*, 1984] et influencées par l'état de stress de la plante. La croissance potentielle de la biomasse des différents compartiments est ainsi pilotée par la phénologie puis modulée par la disponibilité des ressources hydriques et minérales. Dans STICS la culture est caractérisée par sa biomasse aérienne, sa surface foliaire et le nombre et la biomasse des organes récoltés (ici grains) par unité de surface. Le modèle simule l'élaboration du rendement d'après Spaeth & Sinclair [1985] pour les cultures à croissance déterminée. Il représente les racines par leur densité, longueur et la profondeur d'enracinement qu'elles permettent à la culture [Brisson *et al.*, 1998]. STICS s'articule autour de huit sous-modules :

- ceux déjà évoqués traitant de l'écophysiologie des parties aériennes de la plante (développement, interception, conversion, remplissage des grains sujet à une compétition "sourcespuits" selon les principes de Warren-Wilson [1972]),
- ceux traitant du fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines (élongation racinaire, bilan hydrique, bilan azoté) et
- celui à l'interface sol-plante qui prend en compte les techniques de culture (apport d'eau,

dernier stade phénologique

engrais) et effectue un bilan offre/demande. Ce bilan permet de définir des indices de stress [0-1], reposant sur le principe de facteur limitant [Frossard *et al.*, 1996] et agissant comme des freins sur la croissance potentielle.

1.1.1.3 Intérêt d'un couplage

L'étude des concepts et formalismes d'ORCHIDEE et de STICS (qui fait l'objet de chapitres de la thèse de Sébastien Gervois [Gervois, 2004]) révèle une intéressante complémentarité. En résumé, ORCHIDEE a été conçu pour des études à grande échelle avec sa représentation de la diversité de la végétation continentale au moyen d'un nombre limité de PFT co-existant au sein de chaque maille de la grille. Sa résolution du cycle diurne des flux de surface grâce à un pas de temps court le rend compatible avec un aGCM. Initialement développé pour la végétation naturelle, il représente les cultures de façon très simplifiée par le biais de deux types d'herbacées plus productives que les herbacées naturelles, mais sans gestion technique de leur développement ni variabilité de leurs conditions de nutrition azotée. Ces herbacées pseudo-agricoles restent dans ORCHIDEE assimilés à des PFT pérennes alors que les cultures comme le blé ou le maïs ont un cycle annuel suivi d'une période de sol souvent nu. La productivité agricole d'ORCHIDEE n'est ainsi pour l'instant pas considérée comme fiable. STICS, lui, répond à l'application de fertilisants et aux pratiques agricoles, et simule la phénologie propre aux cultures. C'est un modèle cependant à l'origine ni spatialisé, ni compatible avec un modèle de transport atmosphérique à cause de son pas de temps journalier. Il ne s'intéresse pas à la respiration et au bilan net de carbone et ne simule qu'une espèce et un cycle cultural à la fois. STICS est typiquement un modèle d''ingénierie'' conformément à la dénomination de Passioura [1996] : il doit être opérationnel en milieu agricole. Il a été calibré sur des données de terrain, mais malgré sa relative robustesse²⁴, son domaine d'application vu de l'échelle de la biosphère se limite pour l'instant à des milieux tempérés et des pratiques habituelles sur le continent européen.

Pour trois raisons principales, un couplage entre ORCHIDEE et STICS a été entrepris dans Gervois [2004] :

- la demande croissante de la communauté scientifique et politique internationale en estimations quantitatives réalistes des puits et sources de carbone et réserves en eau du sol à différentes échelles de temps et d'espace
- la couverture non négligeable du territoire européen par les cultures ($\approx 30\%$) suite à une anthropisation progressive des surfaces
- la conscience des limitations d'ORCHIDEE en termes de représentation des écosystèmes cultivés et des atouts de STICS pour contribuer à leur amélioration.

Le couplage a été choisi plutôt que le développement de formalismes représentatifs des cultures directement au sein d'ORCHIDEE. Cette méthode permet en effet de tirer parti des connaissances intégrées dans chacun des modèles tout en limitant la modification de leurs codes sources respectifs et en conservant la compatibilité avec le aGCM. Elle a été présentée en détails dans Gervois *et al.* [2004]. En visant particulièrement l'amélioration du cycle saisonnier et de l'intégrale annuelle des flux de CO_2 et de vapeur d'eau, le choix des variables de STICS à exploiter dans ORCHIDEE s'est fixé sur :

- le LAI, contraint par le calendrier agricole (date de semis et date de récolte), qui est une variable-clé des échanges végétation-atmosphère en tant que support de la photosythèse et de la transpiration
- la **hauteur de végétation**, qui influence la rugosité et les conditions énergétiques de surface
- le **profil de densité racinaire**, sans dynamique saisonnière dans ORCHIDEE mais qui influence le stress hydrique

²⁴ capacité à simuler le fonctionnement des cultures en conditions pédo-climatiques variées sans générer de biais importants, au détriment parfois de la précison locale

- l'indice de nutrition azotée, inexistant dans ORCHIDEE mais qui intervient comme un facteur limitant de l'assimilation photosynthétique.

Dans ORCHIDEE-STICS, le bilan de carbone et le bilan d'eau sont calculés selon les formalismes de la version initiale d'ORCHIDEE à partir des flux simulés au pas de temps de la demie-heure. Le contenu en eau du sol et la température de surface sont calculés en "double" dans STICS, mais Gervois [2004] a montré que les divergences entre ces variables simulées d'un côté par ORCHIDEE-STICS et de l'autre par STICS (à réserve utile et profondeur de sol identique) sont faibles. L'évapotranspiration réelle est de +0.48mm/j supérieure dans STICS et la température de surface de $-1^{\circ}C$ inférieure, en moyenne sur le cycle saisonnier sur un site de maïs de Poitou-Charentes en 1996. Ce résultat peut s'avérer différent en conditions plus sèches. Gardons à l'esprit que sans une fusion totale des deux modèles (élimination des doubles calculs), il est inévitable que des incohérences de ce type persistent. Ces divergences peuvent être "ignorées" si l'on considère les variables de STICS utilisées, comme des forçages externes (au même titre que les réflectances mesurées par satellite sont assimilées pour forcer une mauvaise phénologie d'un modèle) avec leurs défauts.

Ce sont les paramètres du **blé d'hiver** et du **maïs** qui ont été retenus pour représenter respectivement les PFT agricoles en C3 et C4, du fait de l'importance de ces cultures en termes de rendement et surface occupée en Europe. Une étude de Gervois [2004] comparative du comportement d'une culture d'hiver (blé d'hiver) et d'une culture de printemps (soja) a soulevé la nécessité de distinguer les deux types de phénologie au sein des cultures en C3.

1.1.2 Consolidation d'ORCHIDEE-STICS en une plate-forme "client-serveur"

Mon travail a consisté dans un premier temps à consolider l'approche d'un point de vue technique. La figure 1.3 présente ORCHIDEE et STICS dans leur configuration de simulation propre à leur échelle initiale d'analyse **a.** puis en mode interfacé **b.** suite à ma collaboration avec Yann Meurdesoif, en charge de développements informatiques.

ORCHIDEE et STICS ont en commun leur besoin en forçage des variables du climat et paramètres du sol, grillés dans le cas d'ORCHIDEE (Fig. 1.3a.). En revanche la carte de végétation est une entrée spécifique à ORCHIDEE, prescrivant la répartition des PFT au sein de chaque maille de la grille spatiale. Un itinéraire technique (ITK) doit être renseigné pour chaque espèce cultivée de STICS (en association avec le type de sol). Cette figure schématise la description des modèles complémentaires ORCHIDEE et STICS, faite respectivement en partie 1.1.1.1 et 1.1.12.

La chaîne opératoire du couplage initial (asynchrone) [Gervois, 2004] consistait en :

- l'exécution d'ORCHIDEE 1 an sur un ensemble de points de grille
- l'extraction des variables température (T), précipitations (P) et rayonnement (R) du fichier de sortie d'ORCHIDEE sur ces points
- leur formattage pour pouvoir servir d'entrée à STICS
- l'éxécution de STICS 1 an \times le nombre de cultures \times le nombre de points
- l'extraction des variables sélectionnées (LAI, hauteur de végétation, profil racinaire, indice de nutrition azotée) sur ces points
- une nouvelle exécution d'ORCHIDEE avec lecture des variables sélectionnées selon le PFT et le point de grille.

Cette succession d'étapes a permis l'obtention des résultats présentés par Gervois *et al.* [2004], De Noblet-Ducoudré *et al.* [2004] et Gervois *et al.* [2008]. Ces premiers résultats encourageants (amélioration de la saisonnalité des flux, validée sur sites, reproduction du triplement observé des rendements du blé en France au cours du XX^e siècle) obtenus avec ORCHIDEE-STICS ont confirmé l'intérêt de l'utilisation couplée des deux modèles. Cependant, l'approche asynchrone



b.

a.

Interface ORCHIDEE-STICS





FIG. 1.3 a. Schéma des modèles ORCHIDEE et STICS dans leur configuration de simulation propre. b. Schéma du modèle ORCHIDEE-STICS en configuration interfacée (sur la plate-forme client-serveur CORBA). La couleur verte indique la spécificité d'ORCHIDEE de simuler simultanément un ensemble de PFT au sein d'une maille de la grille. La couleur rouge fait apparaître les adaptations que nous avons réalisées sur les deux modèles pour les interfacer de manière opérationnelle, et les modifications de l'échelle d'application et variables de sortie qui s'ensuivent.

rendait impossible des simulations s'écartant des objectifs spécifiques déjà traités ou bien à réaliser sur un grand nombre de points et d'années ou dans une multitude de configurations.

La nouvelle interface ORCHIDEE-STICS, créée en collaboration avec Yann Meurdesoif, permet une mise en oeuvre du modèle couplé largement simplifiée. Les avantages de la plate-forme de couplage sont les suivants :

- pas de lecture de fichiers ni d'extractions de variables car les valeurs sont stockées en mémoire
- la plate-forme CORBA 25 gère le circuit des entrées et sorties entre ORCHIDEE et STICS et la communication entre le code source d'ORCHIDEE écrit en fortran 90 et celui de STICS en fortran 77
- une seule éxecution nécessaire, sur le nombre d'années et de points souhaités, pilotée depuis ORCHIDEE, considéré comme "client" faisant une requête à STICS considéré comme "serveur" rendant le service demandé.
- flexibilité sur le nombre et la nature des types de végétation agricole à traiter et des variables à échanger.

ORCHIDEE et STICS ont chacun nécessité des adaptations pour pouvoir fonctionner durablement avec cette interface. L'adaptation d'ORCHIDEE a consisté à positionner au sein des routines adéquates (phénologie, bilan d'énergie, bilan d'eau, photosynthèse) des appels à une nouvelle fonction lisant les variables choisies de STICS. L'adaptation de STICS a été plus délicate car le modèle a dû être spatialisé. Une boucle sur le nombre de points a été ajoutée dans STICS en association avec la création de la dimension "nombre de points" pour toutes les variables de STICS. Cette opération est effectuée pendant une phase de pré-traitement, ce qui rend l'interface partiellement adptable à l'évolution du code source de STICS. La phase d'initialisation de STICS (dans notre cas identique en chaque point) a été séparée de la phase de calcul (en chaque point fonction des variables T, P et R). Par ailleurs, STICS étant initialement construit pour simuler une parcelle à la fois sur un cycle saisonnier, toute anomalie de simulation de la croissance de la culture était signalée immédiatement par une interruption de la simulation. Cette protection n'a pas été conservée dans le cas de nos simulations spatiales qui ne méritaient pas d'être interrompues à cause de quelque points sur lesquels STICS était défectueux. Ces points se trouvaient en général en bordure méditerranéenne ou septentrionale de notre domaine européen d'étude. Les LAI et biomasses des cultures sur ces points, ont été rendues nulles pour la ou les années problématiques. Une adaptation des compteurs de temps a été nécessaire pour le blé de STICS, sans laquelle le PFT "cultures en C3 d'hiver" qu'elle représente ne poussait qu'un an sur deux. En effet, le blé d'hiver étant semé en fin d'année et récolté plus tôt dans l'année, j'ai autorisé un nouveau semis postérieur à une récolte dans la même année.

La figure 1.3b. illustre le fonctionnement de la nouvelle interface ORCHIDEE-STICS. Lorsqu'un PFT agricole est présent dans la carte de végétation, ORCHIDEE appelle le serveur STICS correspondant. Il lui fournit pour tous les points concernés les variables de forçage climatique T, P et R, qui remplacent le fichier de climat lu initialement par STICS pour un point (Fig. 1.3a.). Le serveur STICS-maïs est utilisé comme représentant du PFT "cultures en C4" et nous avons ajouté le **soja** pour représenter les cultures en C3 de type "printemps" distinctement de celles de type "hiver" (Tab. 1.1). Le soja était la seule culture de printemps pour laquelle STICS avait été validé au démarrage de l'approche ORCHIDEE-STICS. STICS renvoie alors automatiquement au pas de temps journalier les variables sélectionnées pour remplacer ou influencer celles calculées par ORCHIDEE pour les trois PFT agricoles (Fig. 1.3b.). Par rapport à l'approche initiale, nous avons désactivé la transmission du profil racinaire de STICS à ORCHIDEE. Il s'agissait en réalité d'un profil racinaire "efficace" et non pas de la densité réelle qui aurait pu effectivement être utile dans le calcul journalier de la biomasse racinaire et de la quantité d'eau accessible aux racines dans ORCHIDEE. Le profil racinaire efficace intégré sur les différents niveaux de sol de STICS

 $^{^{25}}$ http://omniorb.sourceforge.net/

pouvait être nul certains jours avec absence totale d'eau utile dans le sol; il était dans tous les cas inférieur au profil réel car son rôle dans STICS était d'intégrer la limitation hydrique hydrique. Il ne correspondait donc pas à l'objectif de laisser ORCHIDEE calculer son propre stress hydrique. Nous avons en revanche ajouté l'**irrigation** (quantité d'eau apportée par jour à chaque culture) aux variables que STICS transmet à ORCHIDEE, pour qu'ORCHIDEE en tienne compte dans son bilan d'eau. ORCHIDEE calcule ainsi un bilan d'eau et de carbone modifiés pour les PFT agricoles. Les calculs de ces bilans sont inchangés pour les PFT naturels. Les sorties à l'échelle de la maille intégrant tous les PFT (naturels et agricoles) sont d'autant plus modifiées que la fraction agricole totale est importante. Le bilan d'énergie est calculé directement à l'échelle de la maille. Ce sont ses paramètres, comme l'albédo et la rugosité, qui intègrent les différents types de couverts en amont. Leurs valeurs sont modifiées via la prise en compte du LAI et de la hauteur de végétation spécifiques aux cultures et ont un effet sur l'intensité des échanges turbulents (H + LE) et sur la GPP.

Тав. 1.	1 Description	n des 14 ty	pes fonctionnels	de plantes	(PFT) d	u modèle	ORCHIDEE-S	<i>FICS</i>
(en ital	ique, PFT pr	ésents en l	Europe).					

PFT	ORCHIDEE	ORCHIDEE-STICS		
0	Sol nu	permanent		
1	Feuillus tropi	caux sempervirents		
2	Feuillus tr	opicaux décidus		
3	Conifères tempéré	s sempervirents (TNE)		
4	Feuillus tempérés	s sempervirents (TBE)		
5	Feuillus temp	érés décidus (TBS)		
6	Conifères boréaux sempervirents			
7	Feuillus boréaux décidus			
8	Conifères boréaux décidus			
9	Herbacées naturelles en C3			
10	Herbacées naturelles en C4			
11	Pseudo-cultures en C3	Cultures en C3 "hiver"		
12	Pseudo-cultures en C4	Cultures en C4		
13		Cultures en C3 "printemps"		

^a Temperate Needleleaf Evergreen

^b Temperate Broadleaf Evergreen

^c Temperate Broadleaf Summergreen

Cette interface ORCHIDEE-STICS permet de simuler plusieurs années consécutives de fonctionnement de la végétation naturelle et agricole modifiée sur un ensemble de points de Terre. Cet ensemble est décomposé en lots qui sont traités simultanément par des processeurs différents d'une machine parallèle pour plus de rapidité²⁶ Les sorties de ces simulations sur machine parallèle nécessitent ensuite un ré-assemblage. Enfin, comme elles sont (pour chaque pas de temps et PFT) sous forme de vecteurs de la taille du nombre de points à traiter, elles doivent être transformées en matrices longitude/latitude permettant leur visualisation sous forme de cartes géographiques. Nous avons **automatisé** tous ces traitements au sein d'un script de lancement flexible. Toutes les modifications que nous avons apportées au code d'ORCHIDEE sont optionnelles : leur désactivation permet de réaliser une simulation d'ORCHIDEE Standard, sans appel aux cultures de STICS, qui est directement comparable à la simulation avec appel aux cultures de STICS, du point de vue des forçages, conditions aux limites, calculs et traitements²⁷.

²⁶ la version d'ORCHIDEE dans laquelle nous avons introduit la représentation des cultures via l'interface décrite est la version parallélisée par Nicolas Viovy

²⁷ ce "flag" facilitera l'incorporation des développements permettant le couplage avec STICS dans la version

Autres nouvelles fonctionnalités...

D'autres développements que j'ai réalisés ou auxquels j'ai contribué sont décrits brièvement en annexe (module de conservation du carbone lors de conversions d'un type d'utilisation du sol à un autre pour simulations transitoires (C), "couplage" économie-biosphère en collaboration avec l'INRA de Grignon (D)). Ils ont servi des objectifs complémentaires de ceux qui sous-tendent le travail présenté dans cette thèse et ne seront pas exposés ici.

d'ORCHIDEE actuellement couplée avec les composantes atmosphériques et océaniques du modèle climatique de l'IPSL entièrement parallélisé en 2007

1.2 Fonctionnement des surfaces cultivées dans ORCHIDEE-STICS

Suite à la présentation générale des deux modèles et de leur couplage, cette section décrit le fonctionnement des surfaces cultivées tel qu'il est simulé par ORCHIDEE-STICS. J'insiste sur les processus particulièrement affectés par la prise en compte de cultures plus réalistes (via les quatre variables assimilées) et qui feront l'objet des analyses présentées dans les trois chapitres qui suivent : phénologie (2), productivité des cultures (3) et bilan de carbone (4). Le fonctionnement des couverts herbacés anciennement utilisés pour représenter les cultures est précisé, lorsqu'il est différent, à la fin de chaque description de processus. Notre étude ne porte pas sur les PFT naturels, au fonctionnement non modifié par l'utilisation de STICS, mais focalise sur celui des herbacées agricoles améliorées par ce biais. Cependant, dans des analyses de grandeurs agrégées comme le cycle foliaire comparé à celui observé par satellite (2) ou le flux net de carbone comparé à celui reconstitué par inversion du transport atmosphérique (4), il faut garder à l'esprit que leur contribution n'est pas négligeable, sauf en cas d'analyses d'anomalies entre simulations.

1.2.1 Développement du couvert et propriétés bio-physiques de la surface

1.2.1.1 Cycle saisonnier foliaire

Phénologie : début et fin de la saison de croissance La formulation de la phénologie dans ORCHIDEE ne permettait pas de simuler un début de cycle à l'automne (températures décroissantes). Or c'est le cas dans la réalité pour les cultures d'hiver, répandues en Europe. Ces cultures ont un cycle qui se termine tôt (fin juin), alors que les conditions sont encore favorables à la végétation. ORCHIDEE n'avait pas été paramétré pour simuler de sénescence à cette période. En transmettant la variable LAI de STICS à ORCHIDEE, non seulement on force le développement de la surface foliaire mais aussi on contraint implicitement le début et la fin du cycle.

Dans STICS, la date de semis, prescrite, conditionne la date de levée, qui correspond à la sortie de terre des jeunes pousses. La période entre le semis et la levée se décompose en une phase de germination²⁸ et une phase d'élongation dans le sol, jusqu'à la surface, de la gaine protectrice des pousses émergentes. La durée et la réussite de la germination²⁹ dépendent des conditions thermique, hydrique et d'oxygénation du sol. La date de levée marque l'initiation du cycle foliaire dans ORCHIDEE-STICS (le LAI devient non nul) et peut être comparée à des mesures. Les vraies feuilles prennent le relais du ou des cotylédons³⁰ de la graine pour alimenter la plante grâce à la photosynthèse. Ces feuilles qui commencent à s'étendre modifient la réflectance de la surface, grandeur typiquement observée par satellite. La date de semis du blé d'hiver est prescrite au 15 octobre dans STICS (en Beauce), celle du maïs au 20 avril (en Poitou-Charentes) et celle du soja au 1^{er} mai (Tab. 1.2**a.**).

La date de récolte peut être déterminée selon plusieurs critères dans STICS : maturité physiologique, franchissement de seuils d'humidité ou de qualité des grains... Le critère choisi pour ORCHIDEE-STICS est la maturité, ou bien, si les conditions ne sont jamais remplies, une date fixe à ne pas dépasser. Cette date a été prescrite au 22 août, 25 octobre et 5 octobre respectivement pour le blé d'hiver le maïs et le soja (Tab. 1.2a.). Dans le cas d'un franchissement de la date butoir de récolte, le cycle est tronqué et révèle que la culture, telle que simulée dans le modèle, n'est pas parfaitement adaptée à son milieu.

Le stade de maturité est considéré comme atteint à partir du jour où la somme des températures journalières moyennes de l'air, exprimée en "degrés-jours" cumulés depuis le semis, dépasse

 $^{^{28}}$ au sens strict : reprise du développement et du métabolisme (activité enzymatique, respiration) par imbibition d'eau par la graine jusqu'à ce que la future racine perce le tégument

²⁹au sens large : se rapporte aux deux phases évoquées

³⁰feuilles primordiales constitutives de la graine, chargées de réserves dégradées au cours de la germination pour alimenter l'embryon
Тав. 1.2	Principaux	$param\`etres$	du	$d\'eveloppement$	$ph \acute{e} nologiq$	ue, a	du .	LAI	et d	u bilan	d'énergie
comparés	entre STICS	S et ORCH.	IDE	EE-Standard et e	combinés d	ans (OR	CHI.	DEE	-STICS	<i>3.</i>

a.			
Espèce cultivée de STICS (variété)	Blé d'hiver (Talent)	Maïs (DK250)	Soja
Date de semis (jour de l'année)	290	111	120
Date butoir de récolte (jour de l'année)	235	300	280
Degrés-jours efficaces (supérieurs à la temp. de base) semis \rightarrow maturité	1444	1730	1480
Temp. de base \rightarrow max. moyenne de l'air pour les stades de développement (^{o}C)	$0 \rightarrow 28$	$6 \rightarrow 28$	$5 \rightarrow 25$
Besoins en froid (jours, temp. opt. (^{o}C))	33(6.5)	-	-
Photopériode de base \rightarrow saturante (h)	$6.3 \rightarrow 20$	-	$18 \rightarrow 15$
Coefficient k d'extinction du rayon.	0.5	0.7	0.5
Hauteur maximale de végétation (m)	1.50	2.50	0.80

b.				
PFT agricole	$\mathbf{C3}$	$\mathbf{C}\mathbf{A}$	$\mathbf{C3}$	
d'ORCHIDEE-STICS	"hiver"	04	"printemps"	
Tous paramètres de phéno., LAI, inter-		idama CTI	20	
ception & hauteur de végétation		idem. 5110	G	
Albédo des feuilles (visible & IR)	ide	em. ORCH	IDEE	
PFT pseudo-agricole d'ORCHIDEE Standard		$\mathbf{C4}$	C3	
Degrés-jours fin dormance \rightarrow démarrage		400	125	
Temp. de sénescence (^{o}C)		10	5	
Age critique des feuilles (<i>jours</i>)		120	120	
$I \Lambda I = (m^2/m^2)$		۲.	7	
LAI_{max} (m / m)		0	С	

0.7

1.50

0.30

 $\frac{0.7}{0.70}$

0.30

Hauteur maximale de végétation (m)Albédo des feuilles (visible & IR)

Coefficient k d'extinction du rayon.

un seuil prescrit par variété (Tab. 1.2a.). Les degrés Celsius inférieurs à une température de base ou supérieurs à une température maximale (T_{max}) prescrites (Tab. 1.2a.) ne contribuent pas au cumul. On admet que la loi qui régit le développement journalier (Vd_j) de la culture en fonction de la température moyenne du jour j (T_j) est linéaire, $Vd_j = a + b \times T_j$. De nombreuses études [Robertson, 1983; Durand, 1967] ont mis en évidence le lien entre la somme des températures reçues et la durée des phases de développement d'une culture. Les modèles de culture exploitent traditionnellement ce concept de "temps physiologique" ou "temps thermique" et font usage de cette méthode de sommation des températures journalières, retranchant chaque jour à T_j le seuil T_0 égal à -a/b. T_0 , ou "zéro de développement" (par exemple 6°C pour le maïs), est la température de base évoquée ci-dessus, qui annule le développement ($Vd_j = 0$) [Arnold & Sherwood, 1959; Durand *et al.*, 1982]. Le cumul des unités de chaleur (S_J) depuis le jour où un stade de développement P a été atteint jusqu'au jour J (jour quelconque avant le stade suivant S) est effectué comme suit :

$$S_J = \sum_{j=P}^J \Delta T_j \tag{1.1}$$

où $\Delta T_j = max(0, min(T_{max} - T_0, T_j - T_0))$, c'est à dire $0 < \Delta T_j < T_{max} - T_0$. S_J est exprimée en degrés-jours.

On définit une unité de développement U représentant le parcours physiologique³¹ effectué entre le stade P et le suivant S:

$$U = \frac{S_J}{S_{PS}} \times F_v \times F_p \tag{1.2}$$

où $S_{PS} = \sum_{j=P}^{S} \Delta T_j$ et représente le nombre-seuil de degrés jours requis pour passer du stade P au stade S. Ce parcours peut être freiné par un facteur multiplicatif (F_v) compris entre 0 et 1 (sans unité), tant que la satisfaction des besoins en froid pour la vernalisation³² n'est pas complète. Il peut être ralenti également (facteur F_p) si la photopériode³³ n'est pas optimale [Monteith, 1977; Gate, 1995].

La vernalisation s'exerce à partir du semis, tandis que l'action de la photopériode s'exerce entre la levée et le début de remplissage des grains. Pour vernaliser, la culture a besoin d'être exposée un certain nombre de jours à des températures "fraîches" dans une gamme plus ou moins large spécifique à l'espèce cultivée; la température optimale est donnée dans le tableau 1.2a.. Plus la gamme de températures vernalisantes est large, plus la culture a de chances de vernaliser rapidement et moins son développement sera retardé.

La photopériode n'a pas d'effet négatif sur le développement si elle est supérieure (pour les plantes dites "de jour long") ou inférieure (pour les plantes dites "de jour court") à un nombre d'heures seuil, qualifié de photopériode saturante (Tab. 1.2**a**.). La photopériode de base est celle qui annule le facteur multiplicatif F_p et donc l'accumulation des degrés-jours permettant le développement. Le blé d'hiver est une culture vernalisante et photopériodique "de jour long" (la reprise de sa croissance a lieu tôt, avant le printemps) tandis que le soja, culture de printemps, n'a pas de besoins en froid et est photopériodique "de jour court" (sa croissance démarre après le solstice d'été). Le maïs ne vernalise pas et n'est pas sensible à la photopériode (Tab. 1.2**a**.).

Evolution de l'indice foliaire LAI Entre le semis et la maturité, le développement foliaire est divisé en phases (germinative, juvénile, sénescente etc.), délimitées par des stades (levée, LAI maximum etc.). Chaque phase est caractérisée par une portion du nombre de dégrés-jours total requis par chaque variété pour effectuer son cycle complet [Brisson *et al.*, 2003; Gervois *et al.*, 2004] (Tab. 1.2a.. Le passage d'un stade à un autre peut être retardé en fonction des freins précédements évoqués (vernalisation, action de la photopériode). L'incrément journalier de LAI $\frac{dLAI_j}{dt}$ est calculé comme suit :

$$\frac{dLAI_j}{dt} = \frac{dLAI_{max}}{dt} \times \Delta T_j \times f(U) \times min(S_w, S_n) \times f(D)$$
(1.3)

Il est exprimé en $m^2/m^2/j$ et dépend de la quantité de chaleur efficace accumulée ΔT_j (°C), de l'indice de stress hydrique S_w ou azoté S_n le plus limitant (sans unité, compris entre 0 et

³¹ chaleur accumulée rapportée à la chaleur nécessaire pour passer d'un stade au suivant

 $^{^{32}}$ de nombreuses plantes des régions tempérées doivent subir des températures basses pour fleurir; la vernalisation appliquée aux semences ou aux plantules lève les dormances et permet la transformation de bourgeons végétatifs en bourgeons reproducteurs; les variétés de céréales d'hiver, semées à l'automne, passent l'hiver à l'état de plantule et continuent leur croissance l'année suivante; les variétés de printemps bouclent leur cycle en quelques mois; les variétés d'hiver sont plus productives (donnent de meilleurs rendements) mais ne résistent pas au-delà de $-15^{\circ}C$ [Lyssenko, 1952]

³³ le photopériodisme désigne l'ensemble des influences exercées par la durée relative du jour et de la nuit sur de nombreux phénomènes physiologiques

1), d'une fonction de compétition entre plants liée à la densité de semis f(D) et d'une fonction du parcours de développement f(U) (toutes deux sans unité) (Fig. 1.2). Par degré-jour, cet incrément de LAI plafonne à un maximum prescrit par espèce $(\frac{dLAI_{max}}{dt} \text{ en } m^2/m^2/{}^{\circ}C/j)$. La formulation logistique de la croissance foliaire (f(U)) est inspirée des travaux de Singels & Dejager [1991]. L'intégrale de ces incréments journaliers de LAI donne le LAI. Lorsque le stade "LAI maximum" est atteint, STICS considère que la sénescence $(LAI_s \text{ composé de feuilles}$ jaunes) compense chaque jour l'accroissement brut de la surface foliaire : le LAI "vert" (égal à $LAI_{total} - LAI_s$) reste constant jusqu'à ce que la sénescence devienne dominante. Au cours de la phase suivante de sénescence nette, le LAI "vert" décroit linéairement jusqu'à s'annuler. Le LAI n'est dans STICS pas directement influencé par une allocation de biomasse aux feuilles, sauf si celle-ci atteint des proportions critiquement faibles; dans ce cas elle intervient comme un frein supplémentaire à l'incrément de LAI journalier. Dans la plupart des modèles de cultures, la boucle $LAI_j \rightarrow$ photosynthèse \rightarrow allocation aux feuilles $\rightarrow LAI_{j+1}$ est très difficile à simuler de façon réaliste, surtout en phase juvénile. Faute de l'avoir résolu, ces modèles ont donc contourné le problème [Sinclair & Seligman, 2000].

Cette formulation de la phénologie et du LAI dans STICS, utilisée pour forcer ORCHIDEE (Tab. 1.2b.), résulte en les trois cycles foliaires représentés en figure 1.4d. à titre d'exemple sur un pixel du Nord-Ouest de l'Allemagne, en moyenne sur 20 ans. Le cycle du PFT agricole en C3 d'hiver se détache nettement de celui des deux autres PFT qui ont une phénologie de type "printemps". Par rapport aux phénologies des PFT pseudo-agricoles d'ORCHIDEE, toutes deux de type "printemps" (Fig. 1.4c.), l'introduction de celle du blé d'hiver à la place de celle du PFT en C3 (Fig. 1.4d.) peut modifier profondément le cycle saisonnier intégré sur la végétation agricole [Gervois *et al.*, 2004]. La phénologie du PFT pseudo-agricole en C4 (Fig. 1.4c.) est moins modifiée par le couplage avec STICS (Fig. 1.4d.). Le cycle saisonnier du maïs est cependant contraint par le calendrier agricole et le sol devient nu pendant une moitié de l'année (Fig. 1.4d.) Le nouveau PFT en C3 de printemps (soja) a une phénologie similaire à celle du maïs (Fig. 1.4d.) mais c'est dans les propriétés photosynthétiques que ces deux PFT diffèrent. L'évaluation, à l'échelle de l'Europe, de la combinaison de types de phénologie d'ORCHIDEE-STICS est présentée dans le chapitre 2.

Phénologie et LAI de référence Rappelons comment sont formulés la phénologie et le LAI des herbacées pseudo-agricoles d'ORCHIDEE Standard (Tab. 1.2c.), puisque celles-ci serviront de référence dans cette évaluation.

En zones tempérée et boréale, la phénologie des herbacées (naturelles et pseudo-agricoles C3 & C4) suit le cycle saisonnier des températures de l'air, alors qu'en zone tropicale elle est contrainte par celui des précipitations. En Europe, les herbacées naturelles en C4 ne sont pas présentes, étant plus adaptées aux conditions tropicales. Cependant, les herbacées pseudo-agricoles en C4 le sont, car la carte de végétation, construite à partir de méthodes ayant identifié la distribution de la culture du maïs, prescrit des fractions non nulles de surface occupée par ce PFT. Le cycle saisonnier des herbacées (ainsi que des ligneux décidus) se décompose en une phase de dormance hivernale suivie d'une phase de croissance puis de sénescence progressive des feuilles

La modélisation de la date de débourrement (initiation du cycle foliaire grâce à l'émergence des feuilles) est basée sur le travail de Botta *et al.* [2000] ; sa calibration a été faite à partir de données de télédétection par satellite et est spécifique à chaque PFT. Le premier critère de démarrage d'un nouveau cycle est la durée minimale de dormance de 30 jours qui doit être écoulée depuis la fin du cycle précédent. Il évite le démarrage d'un cycle en cas de conditions accidentellement favorables en plein hiver. Les PFT herbacés couvrent une large gamme de latitudes, mais le modèle de leur phénologie reste générique (par définition) : deux critères, l'un thermique et l'autre hydrique, doivent être satisfaits pour que le débourrement ait lieu. En général seul l'un



FIG. 1.4 LAI climatologique (moyenné sur 1982-2003) des PFT naturels ligneux **a.** et herbacés **b.** et des PFT pseudo-agricoles d'ORCHIDEE **c.** et agricoles d'ORCHIDEE-STICS **d.** sur un point de grille d'Allemagne du Nord-Ouest (7.75° E 52.25° N).

est limitant et l'autre est toujours satisfait, même si, en zone de latitudes intermédiaires (où la température moyenne annuelle est comprise entre 10 et $20^{\circ}C$), les deux peuvent conditionner le débourrement. Dans le cas de l'Europe, la condition à remplir pour initier l'allocation de biomasse aux feuilles est une somme de degrés-jours au dessus de $-5^{\circ}C$ depuis la fin de la dormance ; elle doit être supérieure aux seuils donnés dans le tableau 1.2c. Par ailleurs, une quantité non nulle de carbone (dont le maximum est un paramètre spécifique à chaque PFT) doit être disponible dans les réserves pour aider les feuilles et racines à se former. Les réserves sont un compartiment de biomasse de STOMATE qui représente les bourgeons des PFT ligneux décidus ou les pieds pérennes des herbacés.

La fin du cycle phénologique est déterminée par le climat et l'âge des feuilles. A partir d'un âge critique (Tab. 1.2c.), les feuilles deviennent sénescentes. Le début de la phase de sénescence peut être anticipé et sa durée raccourcie si la température moyenne hebdomadaire franchit les seuils de 5°C et 10°C, respectivement pour les herbacées en C3 et en C4 (Tab. 1.2c.).

Le LAI (Fig. 1.4c.) est obtenu par conversion de la biomasse foliaire en surface via le paramètre de surface spécifique des feuilles SLA^{34} :

$$LAI = SLA \times Bf \tag{1.4}$$

La valeur de la SLA est fixée à $0.025m^2 defeuilles/gC$ pour les herbacées [Reich *et al.*, 1992] (Tab. 1.2c.). La biomasse foliaire Bf ($gC/m^2 desol$) dépend de la NPP et de la fraction allouée aux feuilles. Le LAI peut croître jusqu'à atteindre un maximum LAI_{max} ($5m^2/m^2$ pour les herbacées pseudo-agricoles, Tab. 1.2c.). Lorsque ce maximum est atteint, la biomasse foliaire n'augmente plus. En période de sénescence, une partie de la biomasse des feuilles est transférée à la litière chaque jour, pour représenter le processus de mortalité foliaire.

Les figures 1.4a. et 1.4b. montrent les cycles foliaires des PFT ligneux et herbacé en C3, respectivement, qui poussent en zone tempérée. On distingue bien le PFT décidu des deux PFT sempervirents dont le LAI est quasi-constant sur l'année (Fig. 1.4a.). Le cycle folaire du PFT naturel herbacé en C3 (Fig. 1.4b.) est très semblable à celui du PFT pseudo-agricole correspondant (Fig. 1.4c.) mais le LAI_{max} du premier est fixé à $2.5m^2/m^2$ au lieu de $5m^2/m^2$. Par ailleurs, la phénologie du PFT naturel herbacé en C3 est adaptable au climat moyen de chaque point de grille car ses paramètres-seuils sont calculés en fonction de la température moyenne annuelle de l'air. Dans le chapitre 2, où je présente des cycles foliaires agrégés représentant l'ensemble des PFT, les LAI des PFT naturels (Fig. 1.4a.-b.) sont combinés soit à à ceux des PFT pseudo-agricoles d'ORCHIDEE (Fig. 1.4c.), soit à ceux des PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS qui les remplacent (Fig. 1.4d.).

1.2.1.2 Rôle du LAI dans les caratéristiques de surface

Hauteur de végétation Dans STICS, la hauteur du couvert h(m) varie au cours du cycle et est calculée à partir du LAI, d'une hauteur maximale h_{max} (Tab. 1.2a.) et d'une hauteur de base h_0 prescrites par espèce :

$$h = h_{max} \times (1 - e^{-Kh \times LAI_{total}}) + h_0 \tag{1.5}$$

où $LAI_{total} = LAI + LAI_s$. h_0 vaut 0m pour le blé, le maïs et le soja (cultures non pérennes) et le coefficient Kh est fixé à 0.7 pour toutes les espèces cultivées de STICS. Le LAI sénescent LAI_s s'ajoute au LAI "vert" car c'est la somme des deux qui correspond à la quantité de feuilles totales produites depuis le début du cycle, même si une partie est sénescente à partir du moment ou le LAI maximum a été atteint. Dans la version ORCHIDEE-Standard de référence, la hauteur de végétation prescrite par PFT pseudo-agricole (Tab. 1.2c.) est constante pendant toute la saison

³⁴Specific Leaf Area

de croissance et plus faible que celle maximale de STICS. ORCHIDEE-STICS induit donc une saisonnalité accrue de la longueur de rugosité Z_0 (qui dépend aussi du LAI) et son augmentation au maximum de la croissance. En parallèle de cette augmentation de la longueur de rugosité en été, la résistance aérodynamique devrait diminuer, ce qui irait dans le sens de favoriser les échanges turbulents et donc d'augmenter les flux de chaleur sensible H et d'évapotranspiration LE (si l'eau n'est pas limitante). Toutes choses égales par ailleurs ceci aurait pour conséquences de diminuer la température de surface et de lancer une rétro-action négative. Quant aux herbacées naturelles, leur hauteur de végétation est encore plus faible, prescrite à 50*cm* pour les C3 et 60*cm* pour les C4.

Interception du rayonnement Du LAI dépend aussi l'interception du rayonnement par le couvert. La fraction absorbée, aussi appelée faPAR (cf. partie 1.1.1), par toute l'épaisseur de la végétation est calculée dans STICS à partir de la loi de Beer-Lambert :

$$faPAR = \frac{PAR_a}{PAR_i} = 1 - e^{-k \times LAI}$$
(1.6)

où k est le coefficient d'extinction (Tab. 1.2**a**.) qui caratérise la diminution de l'intensité lumineuse au sein de la canopée (feuilles plus ou moins érigées). La particularité d'ORCHIDEE consiste en la discrétisation verticale de la végétation pour permettre, à partir de la même loi, le calcul de la photosynthèse par niveau de LAI :

$$PAR_t(l) = PAR_i - PAR_a(l) = PAR_i \times e^{-k \times l}$$
(1.7)

où l représente le nombre de niveaux de LAI traversés par la lumière (0 en haut de la canopée et LAI au niveau du sol). $PAR_t(l)$ est le PAR transmis, c'est à dire la partie du rayonnement incident qui n'a pas été absorbée en amont du niveau de LAI concerné. $PAR_t(LAI)$ tend vers 0 pour des valeurs de LAI ou k élevées.

Pour les trois PFT agricoles d'ORCHIDE-STICS (Tab. 1.2b.), ce sont les valeurs de k prescrites dans STICS (Tab. 1.2a.) qui ont été adoptées. Les herbacées naturelles ont une valeur prescrite pour k qui vaut 0.5, plus faible que celle des herbacées pseudo-agricoles (Tab. 1.2c.) mais communément admise pour végétation naturelle de type C3 [Monsi & Saeki, 1953].

Dans ORCHIDEE-STICS, le calcul de la fraction de pixel couverte par chaque PFT (couronne foliaire projetée au sol), fS, rapportée à son maximum fS_{max} prescrit s'apparente à celui du faPAR:

$$fS = fS_{max} \times (1 - e^{-k \times LAI}) \tag{1.8}$$

où fS_{max} correspond à la fraction de pixel potentiellement couverte par un PFT donné, prescrite par la carte de végétation. fS tend vers fS_{max} pour de fortes valeurs de LAI et présente un cycle saisonnier délimité par les mêmes dates que le LAI. Quand fS est inférieure à fS_{max} (début de cycle ou phase de sénescence), la fraction de sol qui n'est saisonnièrement pas couverte $(fS_{max} - fS)$ participe au même titre que le sol nu permanent (PFT 0, Tab. 1.1) au calcul du bilan d'énergie. Le sol nu permanent n'ayant pas de cycle saisonnier foliaire $fS_0 = fS_{max,0}$.

Le calcul du bilan d'énergie à l'échelle de la maille voit à chaque pas de temps une surface de sol nu égale à :

$$fS_{nu} = fS_{max,0} + \sum_{PFT=1}^{14} (fS_{max,PFT} - fS_{PFT})$$
(1.9)

et une surface couverte par la végétation égale à :

$$fS_{veg} = \sum_{PFT=1}^{14} (fS_{PFT})$$
(1.10)

L'importance relative de fS_{nu} et fS_{veg} dépend du cycle saisonnier et

$$fS_{nu} + fS_{veg} = \sum_{PFT=0}^{14} (fS_{max,PFT}) = 1$$
(1.11)

C'est sur cette base de représentation de la mosaïque végétale saisonnière que sont calculés l'albédo, la rugosité et l'évapotranspiration représentatifs de la maille. La valeur prescrite pour l'albedo des feuilles (Tab. 1.2c) est combinée à celle, fonction de l'humidité et de la couleur, donnée pour le sol nu [Wilson & Henderson-Sellers, 1985]. Pour la surface nue ORCHIDEE-STICS calcule une évaporation, et pour pour chaque PFT une transpiration, couplée à la photosynthèse via la conductance stomatique.

1.2.2 Productivité et bilan de carbone

1.2.2.1 Photosynthèse et conductance stomatique

Les plantes en tant que producteurs (autotrophes) puisent dans le sol, par l'intermédiaire de leurs racines, de l'eau et des subtances nutritives. Elle produisent du glucose (sucre en C6) grâce à l'énergie lumineuse, en fixant le CO₂ atmosphérique et en libérant de l'oxygène. La photosynthèse est la réaction entre le dioxyde de carbone (qui va être réduit) et l'eau (qui va être oxydée), catalysée par l'enzyme RubisCO³⁵. A partir du glucose peuvent être produits tous les autres composés organiques nécessaires au maintien du métabolisme et à la constitution de phytomasse. L'énergie extraite du rayonnement est stockée dans les combinaisons chimiques des hydrates de carbone (1%) [Heinrich & Hergt, 1993] et le reste dégagé sous forme de chaleur. L'assimilation de CO₂ par photosynthèse est calculée dans SECHIBA à l'échelle de la feuille puis intégrée à l'échelle de la canopée.

Processus d'assimilation à l'échelle de la feuille La photosynthèse se déroule à l'intérieur des cellules chlorophylliennes de la feuille, dont les épidermes supérieur et inférieur sont recouverts d'une cuticule imperméable. Les flux de vapeur d'eau (transpiration) et de CO₂ (assimilation) passent par les stomates, dont le degré d'ouverture (conductance) joue un rôle régulateur des échanges gazeux.

L'expression empirique de la conductance stomatique $g_s (mol/m^2/s)$ a été élaborée à partir de mesures réalisées sur des espèces en C3 en conditions hydriques non stressées [Ball *et al.*, 1987]. g_s est une fonction de l'assimilation $A (\mu mol/m^2/s)$, de $[CO_2]_{atm}$ (C_a , ppm) et de l'humidité relative de l'air (%). La pente de la relation linéaire entre ces variables et g_s est un paramètre important, qui contrôle (à g_s fixée) la quantité de CO₂ assimilée par quantité d'eau transpirée. Sa valeur peut varier fortement selon le type de PFT et le climat [Medlyn *et al.*, 2002].

A est exprimée comme une fonction de la concentration en CO_2 à l'intérieur de la cellule, au niveau du site de carboxylation (C_i , ppm). Une troisième expression lie A et g_s au gradient de concentration en CO_2 entre l'atmosphère et le site de carboxylation $C_a - C_i$. Le système formé par ces trois expressions est résolu au moyen d'un schéma itératif simple qui converge rapidement [Krinner *et al.*, 2005].

Le type photosynthétique le plus commun sur Terre en terme de nombre d'espèces est le type C3 adapté aux milieux frais et humides. L'assimilation photosynthétique est calculée en fonction de l'état physiologique de la plante et de l'énergie solaire reçue [Farquhar *et al.*, 1980]. A dépend du taux de carboxylation effectif $V_c \ (\mu mol/m^2/s)$

$$V_c = min(W_c, W_j) \tag{1.12}$$

³⁵Rubilose bis-phosphate Carboxylase Oxygénase

а.

TAB. 1.3 Principaux paramètres de la production de biomasse comparés entre STICS (modèle RUE) et ORCHIDEE Standard (photosynthèse explicite) et combinés dans ORCHIDEE-STICS.

Espèce cultivée de STICS (variété)	Blé d'hiver (Talent)	Maïs (DK250)	Soja
Temp. min. \rightarrow max. moyenne de l'air			
pour la croissance en biomasse (^{o}C ,	$0 \rightarrow 40 \ (15)$	$8 \rightarrow 42 \ (23)$	$5 \rightarrow 45 \ (30)$
temp. opt. $(^{o}C))$			
Efficience ϵ_c de conversion de l'énergie	2.2	-	-
lumineuse $(t/ha/MJ/j)$ selon la	4.25	3.8	2.5
phase : juvénile, végétatif, reproductif	4.25	3.8	3.2
b.			
PFT agricole	C3	C4	C3
d'ORCHIDEE-STICS	"hiver"	04	"printemps"
Temp. min. \rightarrow max. moyenne de l'air			
pour la photosynthèse (^{o}C , temp. opt.		<i>idem</i> . STICS	
$(^{o}C))$			
$V_{c,max,opt} \; (\mu mol/m^2/s)$	120	120	120
$V_{j,max,opt} \; (\mu mol/m^2/s)$	240	240	240
c.			
PFT pseudo-agricole		$\mathbf{C4}$	$\mathbf{C3}$
d'ORCHIDEE Standard			
Temp. min. \rightarrow max. moyenne de l'air			
pour la photosynthèse (^{o}C , temp. opt.		$13 \rightarrow 55 \ (36)$	$-5 \to 45 \; (30)$
<u>(°C))</u>			
$V_{c,max,opt} \ (\mu mol/m^2/s)$		100	100
$V_{j,max,opt} \ (\mu mol/m^2/s)$		200	200

Ce taux reflète la limitation de la photosynthèse soit par l'énergie soit par le substrat : Si la plante manque de lumière, l'assimilation est limitée par la vitesse de transport des électrons dans les chloroplastes. Cette vitesse contrôle la régénération W_j ($\mu mol/m^2/s$) du RuBP³⁶, molécule en C5 dans laquelle est incorporée le carbone du CO₂. Si la plante manque de CO₂, l'assimilation est limitée par l'activité catalytique W_c ($\mu mol/m^2/s$) de l'enzyme RubisCO permettant la réduction du CO₂ en sucres en C3 (le sucre en C6 étant un intermédiaire réactionnel).

Le calcul de W_j fait intervenir un maximum de régénération $V_{j,max}$ du RuBP et une fonction hyperbolique du flux de photons incident PAR_t au niveau l de LAI où se trouve la feuille (vu en section 1.2.1.2, equation 1.7).

Le calcul de W_c fait intervenir le maximum d'activité $V_{c,max}$ de la RubisCO, les concentrations en CO₂ (C_i) et en oxygène (O_i) dans la chambre sous-stomatique, et des constantes de Michaelis-Menten³⁷. N'oublions pas que la RubisCO a une fonction oxygénase qui joue un rôle dans la photorespiration, qui contrairement au cas des plantes en C4 n'est pas inhibée pour les plantes en C3.

La capacité photosynthétique maximale, donnée par $V_{c,max}$ et $V_{j,max}$, dépend de l'âge relatif

³⁶Rubilose Bis-Phosphate

 $^{^{37}}$ L'équation de Michaelis-Menten permet de décrire la cinétique d'une réaction catalysée par une enzyme agissant sur un substrat pour donner un produit. Elle relie la vitesse de la réaction à la concentration de substrat et à des paramètres constants, caractéristiques de l'enzyme. Ici les substrats sont le CO₂ et l'O₂

 a_{rel} des feuilles via

$$V_{(c,j)max}(a_{rel}) = \epsilon_{rel}(a_{rel}) \times V_{(c,j)max,opt} \times f(T) \times W_s \times \mathbf{S_n}$$
(1.13)

où $\epsilon_{rel}(a_{rel})$ est l'efficience photosynthétique relative (comprise entre 0 et 100%), qui représente schématiquement, en fonction (linéaire) de leur âge relatif (rapporté à leur durée de vie prescrite par PFT), la croissance rapide (une dizaine de jours) le plafonnement (pendant quelques mois, selon le PFT) au maximum 100% jusqu'à l'âge critique, puis la décroissance lente de l'activité photosynthétique des feuilles jusqu'à un minimum de 30% [Ishida *et al.*, 1999].

 $V_{(c,j)max,opt}$ est la capacité photosynthétique maximale optimale (conditions hydriques non stressée et température optimale) prescrite par PFT (Tab. 1.3c.). En l'absence de modélisation du cycle de l'azote, le rapport entre les deux optima (activité de la RubisCO et régénération du RuBP) est défini comme constant et égal à 2 ($V_{j,max,opt} = 2 \times V_{c,max,opt}$) [Leuning, 2002]. Les valeurs de $V_{c,max,opt}$ et $V_{j,max,opt}$ sont identiques pour les deux PFT pseudo-agricole (en C3 et C4) mais cette égalité n'est qu'apparente puisque le modèle de photosynthèse est différent (resp. Farquhar *et al.* [1980] et Collatz *et al.* [1992]). Pour ORCHIDEE-STICS, les valeurs de ces deux optima ont été augmentées de 100 à 120 et de 200 à 240 $\mu mol/m^2/j$ d'après la synthèse de Wullschleger [1993], pour tenir compte implicitement des apports d'engrais, de produits phytosanitaires et de la sélection génétique des variétés de cultures (Tab. 1.3b.). On peut noter que les valeurs des deux optima pour les herbacées pseudo-agricoles d'ORCHIDEE Standard, bien que trop faibles, sont quand même supérieures à celles fixées à 80 et 160 $\mu mol/m^2/j$ pour les herbacées naturelles.

f(T) est une fonction de la température moyenne horaire T de type parabole inversée : f(T) est nulle quand T est inférieure ou supérieure aux températures minimale et maximale seuils ; f(T) est maximale quand T est égale à la température optimale (Tab. 1.3c.). Pour ORCHIDEE-STICS (Tab. 1.3b.), les valeurs de ces paramètres ont été remplacées par celles des paramètres équivalents dans STICS (Tab. 1.3a.). Le maïs est en effet plus adapté aux conditions tempérées que ne l'est le PFT pseudo-agricole en C4, dont les paramètres de f(T) sont les mêmes que ceux du PFT "herbacées naturelles en C4" qui ne pousse pas en Europe.

Si l'humidité du sol décroît, la résistance stomatique augmente [Farquhar & Sharkey, 1982], ce qui revient à dire que la conductance stomatique g_s diminue. Seul l'effet indirect du stress hydrique sur la capacité photosynthétique maximale est pris en compte dans le modèle [Krinner *et al.*, 2005]. W_s est l'indice de stress hydrique défini selon Mcmurtrie *et al.* [1990] :

$$W_s = \frac{f_w - f_{w0}}{f_{w1} - f_{w0}} \tag{1.14}$$

où f_w est la fraction d'eau disponible pour la plante dans la zone racinaire. f_w est nulle pour une fraction d'eau disponible inférieure à celle au point de flétrissement ($f_{w0} = 0.028$) et vaut 1 pour une fraction d'eau disponible supérieure à celle à la capacité au champ ($f_{w1} = 0.5$). W_s vaut donc 0 quand $f_w < f_{w0}$ et 1 quand $f_w > f_{w1}$; entre les deux seuils qui induisent respectivement la fermeture et l'ouverture maximale des stomates , sa valeur est donnée par l'équation 1.14.

Dans ORCHIDEE-STICS, on prend en compte l'effet réducteur du stress azoté sur la capacité photosynthétique maximale $(V_{(c,j)max})$ en multipliant son expression originelle par l'indice de nutrition azotée S_n de STICS, compris entre 0 et 1. Cet indice, qui traduit le niveau de satisfaction des besoins en azote, est le rapport entre la concentration en azote dans la plante et la concentration en azote critique [Gastal & Lemaire, 2002]. L'absorption d'azote (sous forme de nitrates) par la plante dépend de l'offre du sol et de la demande, cette dernière étant essentiellement fonction de la vitesse de croissance de la culture. L'offre est calculée à partir de la quantité d'azote dans le sol, rendue disponible via les racines (dont une densité trop faible peut devenir limitante) et l'humidité du sol (l'eau permet le transport des nitrates jusqu'aux racines). La quantité d'azote dans le sol résulte de l'apport d'engrais minéraux, de la minéralisaton de

l'humus et des résidus de la culture, auxquels s'ajoutent d'éventuels apports organiques externes [Hdadi, 2000] et des résidus de fertilisants de la saison de culture précédente. De l'azote peut être perdu de la zone racinaire par lessivage ou volatilisation [Genermont *et al.*, 1996]. S_n vaut 0 quand l'azote est totalement indisponible et 1 quand l'offre en azote est égale ou supérieure à la demande de la culture. STICS est capable, si l'apport de fertilisants n'est pas fixé, de calculer automatiquement ses propres apports (à raison de 40 kgN/Ha par déclenchement) de manière à ne pas dépasser un seuil de S_n prescrit. Le choix de la valeur de S_n détermine le niveau d'optimisation de la conduite de la culture.

Le calcul de l'irrigation automatique dans STICS se fait selon le même principe que pour la fertilisation, en utilisant un seuil pour le stress hydrique S_w (rappelons que S_w est potentiellement différent du W_s d'ORCHIDEE-STICS car les bilans d'eau ne sont pas couplés). En chaque point et à chaque pas de temps, la quantité d'eau apportée par irrigation calculée par STICS est transmise à ORCHIDEE, qui la voit comme une augmentation des précipitations données par le forçage climatique. Le calcul de l'indice de stress W_s dans ORCHIDEE-STICS est donc quand même en partie lié à son équivalent dans STICS.

La photosynthèse des plantes en C4 est plus efficace que celle des C3 (à $[CO_2]_{atm}$ ambiante) car la photorespiration est inhibée. Ceci tient à la différence de cinétique de l'enzyme PEPcarboxylase par rapport à la RubisCO pour les C3 : la PEP-carboxylase concentre le CO₂ d'un facteur 10 sur le site de carboxylation. Chez le blé (C3), la photorespiration consomme entre la moitié et un tiers du carbone assimilé [Heller *et al.*, 1998]. L'assimilation photosynthétique A est calculée pour les C4, d'après Collatz *et al.* [1992], comme la solution la plus petite (en valeur absolue) d'un système de deux équations polynomiales. Chez les plantes en C4, le rendement de la photosynthèse, déjà élevé, est par ailleurs moins sensible à la concentration en azote.

Intégration verticale à l'échelle du couvert Les plantes optimisent naturellement la distribution verticale de l'azote au sein de la canopée, favorisant ainsi la capacité photosynthétique des niveaux de feuillage supérieurs où la lumière est plus abondante [Sellers *et al.*, 1986]. Comme le flux de photons (PAR_t), les vitesses maximales de carboxylation par la RubisCO ($V_{c,max}$) et de régénération du RuBP ($V_{j,max}$) décroissent à mesure que l'on descend du sommet de la canopée vers la surface du sol. L'approche de Johnson & Thornley [1984], utilisée dans le modèle, suppose une décroissance exponentielle avec une limite asymptotique non nulle (30% de la capacité maximale) :

$$V_{(c,j)max}(l) = V_{(c,j)max}(0) \times [1 - 0.7 \times (1 - e^{-k \times l})]$$
(1.15)

k et l ont été présentés en section "Interception du rayonnement" 1.2.1.2 (équations 1.6 et 1.7).

La conductance de la canopée g_c (l'inverse de la résistance de la canopée) est calculée par intégration de la conductance stomatique g_s sur tous les niveaux l de LAI :

$$g_c = \int_0^{LAI} g_s(l) \times dl \tag{1.16}$$

Cette conductance est utilisée dans le calcul du flux de transpiration par PFT, qui est analysé en deuxième partie du chapitre 3.

L'assimilation A est intégrée de la même manière sur le couvert et donne la GPP, transmise de SECHIBA à STOMATE par PFT :

$$GPP = \int_0^{LAI} A(l) \times dl \tag{1.17}$$

La GPP, avec les respirations autotrophe et hétérotrophe décrites dans les sous-parties suivantes, entre dans le calcul du flux net de CO_2 , analysé au chapitre 4.

1.2.2.2 Respiration autotrophe et devenir des assimilats

Les respirations de maintenance et de croissance Une partie des assimilats issus de la productivité primaire brute (GPP) est utilisée par la plante pour la croissance des nouveaux tissus (respiration de croissance R_c) et l'entretien des tissus en place (respiration de maintenance R_m) dans ses différents compartiments (Tab. 1.4). Ces deux termes qui composent la respiration autotrophe ($R_a = R_c + R_m$) correspondent à deux flux (gC/m^2) d'origine différente sur la figure 1.1.

Pour tous les compartiments sauf les feuilles, R_m est fonction de la biomasse du compartiment, le coefficient de la relation linéaire étant lui-même linéairement dépendant de la température [Ruimy *et al.*, 1996]. Pour les feuilles, R_m est fonction du LAI selon une formulation empirique qui permet de prendre en compte le fait que la maintenance dépend du profil du ratio C/N au sein de la canopée [Ruimy *et al.*, 1996].

Une fraction f jusqu'à 80% de la GPP du pas de temps peut être utilisée pour satisfaire la respiration de maintenance. Si R_m sommée sur tous les compartiments est supérieure à ce seuil, alors la masse de carbone manquante est prélevée directement de la biomasse des compartiments proportionnellement à leur taille relative.

La biomasse allouable (B_a) restant après prélèvement de R_m subit une perte de c = 28%pour satisfaire R_c [Mccree, 1974]. La biomasse allouable définitive (B'_a) est celle qui est répartie entre les différents compartiments souterrains et aériens de la plante (Tab. 1.4).

Répartition de la biomasse allouable entre compartiments L'allocation du carbone dans ORCHIDEE-STICS est traitée comme dans ORCHIDEE selon Friedlingstein *et al.* [1999], à quelques modifications près [Gervois *et al.*, 2004].

Compartiment
Feuilles
Bois de sève aérien
Bois de sève souterrain
Bois dur aérien
Bois dur souterrain
Racines fines
Organes reproductifs (fruits, fleurs)
Réserves de carbohydrates

TAB. 1.4 Description des 8 compartiments de biomasse d'ORCHIDEE. En italique, compartiments vides chez les herbacées.

Elle suit l'hypothèse selon laquelle la plante alloue le carbone aux tissus en réponse à des limitations externes comme la disponibilité en eau, en lumière et en azote. En l'absence de modélisation du cycle de l'azote, la disponibilité en azote est paramétrée en fonction de l'humidité et de la température moyennes du sol sur les 30 derniers jours. Plus elles sont élevées plus l'azote est considéré comme disponible. Les formulations prennent en compte la compétition entre racines et tiges (bois de sève aérien³⁸, Tab. 1.4) en fonction du facteur limitant. Plus un stress est important, plus le compartiment capable de minimiser le stress (et donc d'optimiser la ressource) est favorisé. Si l'eau ou l'azote manque, l'allocation se fait préférentiellement aux racines, aux dépens des feuilles et tiges³⁹. Si la lumière manque, elle se fait préférentiellement aux tiges ; la plante cherche en effet à s'élever le plus possible.

L'allocation aux "fruits" est constante et égale à 10% de B'_a , comme dans [Sitch *et al.*, 2003], jusqu'à la sénescence, où B'_a est alors entièrement allouée aux réserves de carbohydrates. Ces réserves servent à initier le cycle foliaire (pour les PFT herbacés et décidus), quand la GPP est très faible en début de la saison suivante (Fig. 1.1). Le carbone mobilisé des réserves vers les feuilles permet au PFT d'atteindre rapidement une couverture foliaire autonome. Si les réserves sont vides, le cycle ne démarre pas, comme cela a été évoqué dans la section décrivant la phénologie dans ORCHIDEE (1.2.1.1). Ces réserves représentent pour les PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS les graines semées.

L'adaptation de l'allocation pour ORCHIDEE-STICS a consisté à ajuster la biomasse allouée aux feuilles pour que celle-ci soit en cohérence avec le LAI forcé par STICS [Gervois *et al.*, 2004], via le paramètre *SLA* (Tab. 1.2c.). Les relations allométriques avec les autres compartiments sont sont en revanche perdues. Une fois la fraction allouée aux feuilles extraite de B'_a , l'allocation se fait dans les mêmes proportions que dans la version standard d'ORCHIDEE. En cas de B'_a insuffisante, les réserves contribuent à l'allocation aux feuilles.

Récolte et transfert de carbone vers la litière Dans le but de simuler avec ORCHIDEE-STICS la dynamique d'un compartiment "organe de récolte", il faudrait créer un schéma d'allocation spécifique dans STOMATE. Dans un premier temps, on a opté dans cette thèse pour une estimation indirecte du rendement des cultures à partir de la NPP (description et évaluation au chapitre 3). La NPP est estimée à partir de la GPP, de laquelle on ôte le flux de CO_2 qui retourne à l'atmosphère par respiration autotrophe :

$$NPP = GPP - R_a = GPP - R_m - R_c \tag{1.18}$$

La NPP est équivalente à la biomasse allouable B_a^{\prime} si la GPP est non nulle et si R_m < $0.8 \times GPP$, sinon, elle peut être inférieure voire devenir négative. Ceci signifie alors que la plante pompe dans ses réserves voire perd de la biomasse car elle respire plus qu'elle ne produit. En général pour une plante non stressée la NPP et la respiration autotrophe R_a sont du même ordre de grandeur. Le LAI forcé par STICS intervient dans ce bilan en tant que support de la photosynthèse (GPP et R_c) et comme contrainte à la biomasse des feuilles (dont dépend en partie R_m). Son cycle saisonnier force aussi le début de la période de sénescence et le moment du transfert d'une partie de la biomasse vers la litière à la récolte. La sénescence démarre dans ORCHIDEE-STICS quand le LAI devient décroissant et la récolte a lieu quand le LAI devient nul. On ne tient pas compte de la période où le blé reste en réalité sur pied alors que son LAI "vert" est nul, période où le grain se déssèche avant que les conditions d'humidité des grains (ou du sol pour le passage des machines) ne soient favorables à la récolte. La date de récolte n'a d'effet dans ORCHIDEE-STICS que pour la partie non récoltée de la biomasse, transférée à la litière. La partie récoltée, ou "exportée" du système (E), est considérée comme respirée uniformément à raison de E/365 par jour. En l'absence d'un réel schéma d'allocation aux grains dans STOMATE, la partie exportée (considérée dans le bilan de carbone analysé au chapitre 4) correspond à la somme de la biomasse qui constitue les compartiments "fruits" et "réserves de carbohydrates", à laquelle on retire la quantité de carbone qui doit rester disponible pour démarrer le cycle suivant. Le flux E n'est pas strictement égal au rendement discuté au chapitre 3, car dans ce dernier, j'ai

 $^{^{38}}$ Il n'y a pas d'allocation au bois dur aérien ou souterrain car il résulte de la transformation du bois de sève, et *a fortiori* pour les herbacées car ces compartiments sont spécifiques aux PFT ligneux

³⁹Notons que les stress en eau et en azote ne se cumulent pas, c'est le plus limitant des deux qui joue, comme c'est le cas dans STICS (section 1.1.1.2 et 1.2.1.1)

voulu tester différents indices de récolte (fraction récoltée par rapport à la biomasse de tous les compartiments aériens), dont ceux liés à l'allocation dans STICS.

Les rendements calculés par STICS n'ont pas directement été utilisés, en partie car ils reposent sur la biomasse calculée avec l'approche RUE (évoquée en section 1.1.1.2 et dont les valeurs de paramètres sont données dans le tableau 1.3a.), qui considère une proportionnalité entre la biomasse aérienne et le rayonnement incident modulée par les stress. On a en effet souhaité, avec ORCHIDEE-STICS, conserver la productivité calculée de façon mécaniste par STOMATE. La deuxième raison est liée à l'objectif de simuler de manière comparable la productivité des PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS et celle des PFT pseudo-agricoles de la version standard d'OR-CHIDEE. Les termes de respiration ne sont par ailleurs pas simulés par STICS mais toutefois nécessaires au calcul du bilan de carbone. En revanche on a utilisé les indices de récolte simulés par STICS en faisant le rapport de la biomasse du compartiment "organe de récolte" et de celle des parties aériennes.

La litière, dont la quantité est augmentée saisonnièrement des parties de la plante sénescentes et des parties non exportées à la récolte, se répartir en 2 niveaux verticaux : la litière au-dessus du sol, alimentée par les feuilles et les tiges et la litière souterraine, alimentée par les racines. Dans chacun de ces niveaux, la litière peut être de deux natures. La litière dite métabolique contient le carbone constitutif, par exemple, de la cellulose, qui se dégrade vite. La litière dite structurelle contient le carbone constitutif de la lignine, qui se dégrade plus lentement. Le carbone issu de la décomposition de ces litières, en fonction de la température et de l'humidité du sol, est en partie relâché dans l'atmosphère sous forme de $C0_2$ et en partie distribué entre les différents réservoirs de matière organique du sol (Fig. 1.1) selon Parton *et al.* [1988].

Réservoir	Type de carbone	Temps de dégradation
Actif	Biomasse microbienne et métabolites	1à 5 ans
Lent	Matière stabilisée de décomposition	20 à 40 ans
Passif	Matière organique fortement stabilisée	200à 1500 ans

TAB. 1.5 Description des 3 réservoirs de carbone dans le sol d'ORCHIDEE.

1.2.2.3 Respiration hétérotrophe et flux net de CO₂

Les trois réservoirs de carbone présentés dans tableau 1.5 ne correspondent pas à une discrétisation verticale du sol mais sont caractérisés par des constantes de temps différentes. Le réservoir actif reçoit le carbone issu de la litière métabolique et le réservoir lent celui issu de la litière structurelle, riche en lignine (Fig. 1.1). Le carbone qui n'a pas encore été respiré "circule" des réservoirs à faible constante de temps vers ceux à grande constante de temps (passif) [Parton *et al.*, 1988]. La respiration hétérotrophe, réalisée par les micro-organismes décomposeurs en fonction de l'humidité, la température et les conditions d'oxygénation, regroupe les flux de carbone vers l'atmosphère issus des 4 litières et 3 réservoirs. Ces 7 compartiments reflètent l'origine, la nature et le stade de la dégradation de la matière organique.

La prise en compte dans ORCHIDEE-STICS de l'opération de récolte spécifique aux cultures revient à extraire en chaque point de grille du carbone qui aurait naturellement alimenté la litière. Ceci résulte (à biomasse et conditions de dégradation égales) en une moindre accumulation du carbone dans le sol et un moindre dégagement par respiration par rapport aux pseudo-cultures d'ORCHIDEE. Cependant, la respiration hétérotrophe inclut le flux de $C0_2$ provenant de la dégradation de la matière organique présente avant l'apport de biomasse pendant la saison simulée. L'estimation du flux net de CO_2 (NEP) est très fortement dépendante de l'historique du



FIG. 1.5 Schéma descriptif du bilan de carbone simulé pour les PFTs naturels (et agricoles avant couplage avec STICS) **a.** et les PFTs agricoles plus réalistes **b.**. Les flux de carbone entrant dans la biosphère sont indiqués en vert et les flux sortants en brun.

sol, représenté par l'initialisation de la simulation analysée. Le labour des surfaces cultivées n'est pas pris en compte dans ORCHIDEE-STICS, mais on sait qu'il assure en général une meilleure oxygénation du sol, qui accélère la minéralisation du carbone. Gervois [2004] a montré quelles limitations cela implique dans la simulation des stocks de carbone du sol.

En résumé de la partie 1.2.2, ORCHIDEE-STICS est capable de simuler pour chaque PFT (ou, pour les flux du sol, pour chaque groupe de PFTs naturels et agricoles ou pseudo-agricoles) les flux de carbone suivants (Fig. 1.5**a.** :

- l'assimilation de CO₂ par photosynthèse (*GPP*),
- l'accumulation de biomasse (NPP) après déduction de la respiration autotrophe $(R_a, de croissance R_c et de maintenance R_m)$,
- la sénescence des tissus et le dépôt en litière,
- la respiration hétérotrophe (R_h) à partir de la décomposition de la litière (aérienne et souterraine, structurelle et métabolique),
- le transfert de la litière vers les différents compartiments de la matière organique du sol à temps de résidence croissants (actif, lent, passif)
- et la respiration hétérotrophe (R_h) à partir de la décomposition de la matière organique du sol.

C'est la différence des flux bruts de l'atmosphère vers la biosphère et de la biosphère vers l'atmosphère qui constitue la NEP. Celle-ci peut-être calculée journalièrement.

$$NEP = NPP - R_h = GPP - R_a - R_h = GPP - R_c - R_m - R_h = GPP - R_{eco}$$
(1.19)

où R_{eco} est la respiration totale de l'écosystème évoquée en figure 1.1. A l'échelle d'une maille d'ORCHIDEE, ce flux peut-être comparé aux mesures de flux nets effectuées sur site [Gervois *et al.*, 2004; Bondeau *et al.*, 2007; Reichstein *et al.*, 2007]. Dans notre étude à l'échelle Européenne au chapitre 4, il convient de calculer la NBP⁴⁰ :

$$NBP = NPP - R_h - E \tag{1.20}$$

⁴⁰Net Biome Production

qui considère les flux additionnels plus ponctuels liés aux perturbations des écosystèmes. La récolte des cultures en C4 et en C3, d'hiver ou de printemps, en est une. La perturbation par les feux de biomasse, liée au module LPJ, n'est pas activée dans ORCHIDEE-STICS. L'hypothèse sur E suppose implicitement

- que tout ce qui a été produit et récolté est consommé en un an,
- que cette consommation ne fait pas l'objet de variations saisonnières
- et qu'il n'y a pas d'échanges latéraux de matière (analysés dans Ciais et al. [2007]).

Ce flux de récolte E fait la différence entre les figures 1.5**a.** et 1.5**b.**. La prise en compte du flux de récolte rend possible de façon consistante la comparaison des flux de CO₂ à grande échelle

- entre les PFT naturels (herbacés ou ligneux) et les PFT agricoles (ou pseudo-agricoles)
- $-\,$ entre les PFT agricoles et pseudo-agricoles
- et entre les sorties du modèle et les estimations par inversion atsmophérique.

1.3 Simulations à l'échelle de l'Europe

1.3.1 Forçages atmosphériques

1.3.1.1 Climat

Pour des simulations régionales spatialisées, par opposition à locales, les données de forçage du modèle ne peuvent pas être directement les données météorologiques mesurées sur site. On utilise des données grillées, produites à partir du réseau mondial de station de mesures. Pour cette étude, les données du CRU⁴¹ [New *et al.*, 2000] ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, mensuelles, 1900-2000) ont été combinées aux ré-analyses NCEP⁴² [Kalnay *et al.*, 1996] ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$, journalières, 1948-2000) par Nicolas Viovy. Des ré-analyses NCEP est extraite la variabilité intra-mensuelle sous forme d'anomalies journalières par rapport à la moyenne de chaque mois. Cette variabilité est appliquée aux champs mensuels des données CRU et est donc identique pour les 4 mailles CRU qui composent une maille NCEP. La variabilité inter-annuelle dans les données journalières recomposées résulte de la combinaison des deux jeux originaux, sauf pour la période 1900-1948 où seule la variabilité de l'année 1948 est disponible dans NCEP, ainsi appliquée aux années qui la précèdent. Ceci n'est pas problématique dans le cadre de l'analyse (au chapitre 3) des années extrêmes 1976 et 2003 exclues de cette période.

Les variables climatiques dont ORCHIDEE-STICS a besoin pour chaque maille au pas de temps semi-horaire sont les rayonnements incidents (R pour SW), la température (T), les précipitations (P), l'humidité spécifique de l'air, et la vitesse du vent. Il a donc été nécessaire de re-créer un cycle diurne pour ces variables journalières du jeu de données recomposées "CRU+NCEP".

- L'évolution de la température a été reconstituée via un fit sinusoïdal des températures minimale et maximale journalières associées respectivement au lever du jour et à 14h (heure locale).
- Les précipitations d'une journée sont répartie en 1/8 toutes les trois heures, sans variabilité spatiale du mode de répartition.
- On a fait varier **le rayonnement** de la journée en fonction de l'angle solaire, lui-même dépendant de la latitude et de la date.
- Les variations intra-journalières de trois variables ne sont pas rigoureusement cohérentes entre elles. Les autres variables sont interpolées linéairement et ne présentent pas de cycle diurne.

Ce sont toutefois les champs journaliers de température, rayonnement et précipitations qui sont utilisés par STICS (en mode couplé donc spatialisé) pour le calcul du LAI et autres variables avec lesquelles on contraint la croissance des PFT agricoles d'ORCHIDEE (Fig. 1.3b.).

1.3.1.2 CO₂

Un forçage en $[CO_2]_{atm}$ est aussi nécessaire à ORCHIDEE pour le calcul de l'assimilation photosynthétique. La teneur en CO₂ de l'atmosphère (rapport de mélange) augmente sur tout le globe de 302 parties par million (*ppm*) en 1915 à 373 *ppm* en 2003, approximativement deux fois plus vite ces trente-cinq dernières années (325 *ppm* en 1970) que durant les cinquante années qui ont précédé. STICS, dans sa version actuellement couplée à ORCHIDEE, ne répond pas à cette augmentation et considère une $[CO_2]_{atm}$ constante. Dans la présente étude, le LAI simulé n'a pas de tendance liéee à la teneur en CO₂ mais la photosynthèse peut être légèrement influencée.

Sans ajustement des paramètres du modèle STICS, on prend un risque à faire tourner le modèle à partir d'un forçage à la résolution $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, par construction moins variable que les données météorologiques habituellement utilisées. En effet STICS, comme d'autres modèles de culture, est sensible aux effets de seuils lors de phases critiques du développement (germination,

⁴¹Climate Research Unit

⁴²National Centers for Environmental Predictions

vernalisation, floraison, remplissage des grains...) et a été calibré avec des données pouvant présenter des caractéristiques ponctuellement très marquées (gel, excès de température ou d'eau, sécheresse locale...). Les non linéarités du système font que l'intégrale du développement simulé sur la saison de croissance peut être différente selon si le modèle a été forcé par l'un ou l'autre type de données. Les paramètres de STICS pour les trois cultures utilisées dans notre étude comme représentantes des trois PFT agricoles n'ont pas été modifiés.

1.3.2 Paramètres du sol

Le sol est caractérisé dans ORCHIDEE par une couleur, influençant le calcul de l'albedo du sol et une texture, influençant celui de la décomposition de la matière organique. Le bilan d'eau d'ORCHIDEE n'est en revanche pas affecté par la texture du sol, la réserve utile du sol étant considérée constante et égale à 150 mm/m, soit 300 mm étant donné que la profondeur du sol est prescrite à 2 m^{43} . En l'absence de données de texture spatialisées les fractions de sables, limons et argiles ont été fixés à 1/3 chacune pour chaque maille du modèle. Pour le calcul des 4 variables de couplage, on a conservé la texture du sol telle qu'originellement vue par STICS, sans la forcer par celle prescrite dans ORCHIDEE. Les paramètres de la texture du sol de STICS sont typiques des sols riches du Bassin Parisien. Ceci tient implicitement compte du fait qu'au sein d'une zone représentée par une maille d'ORCHIDEE, les meilleurs sols sont affectés à l'agriculture. La texture du sol n'a, en résumé, pas de variabilité spatiale dans nos simulations, ce qu'il faut avoir à l'esprit dans l'interprétations des sorties d'ORCHIDEE-STICS.

1.3.3 Carte de végétation

L'information sur la distribution spatiale des PFT (fS_{max} , vues en partie 1.2.1.2) n'est pas directement nécessaire aux calculs réalisés indépendemment sur tous les PFT (phénologie, photosynthèse, respiration autotrophe, transpiration, hauteur de végétation...). fS_{max} est cependant indirectement utilisée via le contenu en eau du sol, car la transpiration est différente selon le PFT mais prélève l'eau du réservoir profond commun. Le bilan d'eau rétro-agit sur ce même flux au pas de temps suivant. De même, pour le calcul du bilan d'énergie (rayonnement net, température de surface...) à l'échelle d'une maille entière ou pour l'agrégation spatiale des sorties du modèle en vue de diagnostics intégrés (par ex. LAI ou flux net de CO₂ de la maille), les fractions de surface occupée par chaque PFT dans chaque maille doivent être connues.

1.3.3.1 Obtention des fractions de surfaces agricole totale et naturelles

Dans le cadre de la préparation des forçages "CRU+NCEP" une carte de végétation à la résolution 0.5^{o} a été constituée sur la base de plusieurs sources :

- Les données **CORINE**⁴⁴ Land Cover 2000 (CLC2000), à 100 m de résolution, ont été produites à partir de photos satellites LANDSAT et SPOT aquises entre 1987 et 1994, mises à jour avec les données obtenues en 2000) [Büttner *et al.*, 2004] Elles permettent de représenter en 44 catégories (dont 10 agricoles et 1 prairies) l'occupation d'un territoire par les surfaces artificialisées (ville, routes), les surfaces cultivées et les surfaces en forêts et les milieux semi-naturels, les zones humides et les surfaces en eau (lacs, rivières).
- Sur les parties de l'Europe où les données CLC2000 n'étaient pas disponibles, les données **PELCOM**⁴⁵ à résolution un peu moins fine $(1 \ km)$, représentant l'occupation du territoire en 16 catégories (dont 3 agricoles et 1 prairies), ont été utilisées.

⁴³dans la version d'ORCHIDEE n'incluant pas la nouvelle hydrologie développée par P. de Rosnay

⁴⁴COoRdination de l'INformation sur l'Environnement

⁴⁵Pan-European Land Use and Land Cover Monitoring

Une correspondance a dû être établie entre ces catégories et les PFT d'ORCHIDEE. En ce qui concerne les surfaces cultivées, elles ont toutes été agrégées en une seule catégorie agricole, pour correspondre au PFT "pseudo-cultures en C3" d'ORCHIDEE Standard. Sur l'Europe, la nomenclature des catégories disponibles ne permettait pas de faire la correspondance avec le PFT "pseudo-cultures en C4" (comm. pers. Viovy).

La fréquence d'apparition des catégories d'occupation du territoire a été comptabilisée puis les correspondances appliquées. Il en résulte une carte de végétation qui affecte à chaque maille de 0.5° une mosaïque de PFT. La faction agricole totale par maille (Fig. 1.7a.) atteint 90% dans les zones fortement cultivées du Nord, de l'Ouest et du Sud-Ouest de la France, les provinces espagnoles de Castille, la Plaine du Pô en Italie, le Sud-Est de l'Angleterre, le Nord de l'Allemagne, La Pologne et les Balkans. En moyenne sur l'Europe (fenêtre limitée au Nord par l'Irlande et à l'Est par la Pologne, incluses), les PFT agricoles occupent 40% de l'espace. Les écosystèmes naturels qui en occupent le reste sont à dominante herbacée en Irlande et dans l'Ouest de la Grande-Bretagne, à dominante ligneuse sur la plus grande partie du territoire et mixtes sur les massifs montagneux). Dans la réalité les cultures occupent moins de 40% de la surface, mais les prairies gérées, dont la représentation reste à inclure dans ORCHIDEE, ont été comptabilisées dans la surface agricole vue par le modèle. Dans le cas des mailles côtières ou comprenant des catégories de surfaces non potentiellement occupables par de la végétation (donc ne correspondant à aucun PFT), les pourcentages d'occupation de la surface de la maille par chaque PFT ont été ré-échelonnés de manière à ce que leur somme égale 100%. L'information sur la fraction de mer ou glacier ainsi écartée est stockée dans une autre variable.

1.3.3.2 Agrégation de 19 catégories de cultures en 3 PFT agricoles

La carte de végétation combinant CLC2000 et PELCOM (CLC2000+PELCOM) permet de connaître de façon satisfaisante la fraction agricole totale par maille (Fig. 1.7a.). En revanche, la répartition entre PFT agricoles C3 et C4 peut-être améliorée pour

- pallier l'absence de cultures en C4 en Europe et
- faire la distinction entre types "hiver" et types "printemps" au sein des cultures en C3.

Même si les cultures en C4 ont une origine tropicale, le maïs occupe en Europe une surface non négligeable (Fig. 1.6c.) quoiqu'en moyenne plus faible que celle des cultures en C3 comme le blé (Fig. 1.6b.). Dans les Balkans, la culture du maïs est même dominante par rapport à d'autres cultures et représente environ 40% des surfaces cultivées. Tout en conservant la fraction agricole totale fournie par la carte CLC2000+PELCOM, j'ai souhaité attribuer un poids à chacun des 3 PFT agricoles représentés dans la présente version d'ORCHIDEE-STICS. Pour ce faire, j'ai utilisé les données globales de Leff *et al.* [2004] qui décomposent les surfaces agricoles en 19 catégories (prairies exclues). Elles combinent des informations d'origine satellitaire et statistique. Le tableau 1.6 présente les correspondances établies entre ces catégories et les 3 PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS.

Notons que le PFT C4 ne regroupe, en Europe, que le maïs. Parmi les cultures en C3 dans la réalité, celles qui ont la particularité de nécessiter des températures froides pour vernaliser (processus vu en partie 1.2.1.1) sont peu nombreuses. Il s'agit du blé, de l'orge et du colza, par ordre d'importance décroissante en termes de surface cultivée en Europe. Le blé couvre d'après Leff *et al.* [2004] surtout le Nord-Ouest de la France, l'Angleterre (jusqu'à 50% de la surface des mailles), L'Italie, et l'Europe de l'Est (Fig. 1.6b.) tandis que l'orge se concentre en Irlande (30%), Angleterre, et Espagne. Le colza ne couvre jamais plus de 10% de la surface et se concentre dans la moitié Nord de l'Europe. Ces trois cultures présentent en réalité un gradient de variétés allant du type hiver au type printemps selon leurs besoins en froid et les dates de semis qui en découlent. ORCHIDEE décompose maintenant les cultures en C3 en deux groupes selon leur phénologie de type "hiver" ou "printemps". J'ai décidé de regrouper le blé et le colza dans le PFT "C3 hiver" et



a. Fraction agricole totale Leff *et al.* [2004]









f. Cultures en C3 d'hiver/Total

4°E 8°E 12°E

16°E

20°E

0

e. Maïs/Total



g. Cultures en C3 de printemps/Total



FIG. 1.6 Fraction de maille occupée par l'ensemble des cultures selon Leff et al. [2004] **a**. Fraction de maille occupée par **b**. le blé et **c**. le maïs selon Leff et al. [2004]. Fraction relative de blé **d**. et maïs **e**. au sein de l'agriculture d'une maille. Fraction relative agrégée pour les **f**. cultures en C3 d'hiver et **g**. cultures en C3 de printemps.



FIG. 1.7 Fraction de maille occupée par l'ensemble des cultures selon CORINE/PELCOM **a**. Fraction de maille occupée par **b**. les cultures en C4 (mais pour l'Europe) **c**. les cultures en C3 d'hiver et **d**. les cultures en C3 de printemps après combinaison des fractions agricoles totales CORINE+PELCOM et des fractions relatives selon Leff et al. [2004] agrégées par PFT.

Catégorie Leff <i>et al.</i> [2004]	PFT ORCHIDEE-STICS
Blé Colza	C3 d'hiver
$Ma\"is^{\mathrm{a}}$	C4
Soja Orge Tournesol Betterave Pomme de Terre Seigle Légumineuses autres	C3 de printemps

TAB. 1.6 Agrégation des catégories de cultures de Leff et al. [2004] en 3 PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS.

^aLes cultures tropicales en C4 (canne à sucre et sorgho) et en C3 (riz, mil, palmier à huile, arachide, coton et manioc) contribuent aux 19 catégories mais ne sont pas présentes en Europe, elles ne jouent pas dans l'agrégation.

l'orge dans le PFT "C3 printemps" avec les autres cultures non vernalisantes (Tab. 1.6).

1.3.3.3 Ajustement des fractions relatives par PFT au sein de la fraction agricole

La fraction agricole totale des données de Leff *et al.* [2004] (somme sur les 19 catégories, Fig. 1.6a.)) n'a pas été utilisée directement. Sa distribution en Europe est assez différentes de celle obtenue par combinaison CLC2000+PELCOM (Fig. 1.7a.). J'ai privilégié cette dernière à cause de sa finesse sur l'Europe. Les divergences entre les deux peuvent provenir de l'origine et du traitement des données satellites ainsi que des méthodes de classification appliquées. Lorsque la fraction agricole totale dans CLC2000+PELCOM est non nulle, on lui applique les fractions relatives des 3 PFT agricoles après agrégation des catégories de Leff *et al.* [2004].

Les fractions relatives de blé et de maïs (resp. Fig. 1.6d.-e.) sont uniformes dans chaque pays, ce qui rappelle que les données de Leff *et al.* [2004] ont été construites à partir d'un pourcentage unique par pays issu des données nationales des surfaces récoltées mises à disposition par la FAO⁴⁶. L'agrégation des catégories de cultures réalisée comme indiqué précédemment (Tab. 1.6) conduit sur l'Europe aux fractions relatives de la figure 1.6f. pour le PFT "cultures en C3 d'hiver" (blé et colza), 1.6e. pour le PFT cultures en C4 (maïs) et 1.6g. pour le PFT "cultures en C3 de printemps". Il n'y a qu'en Angleterre que les cultures en C3 d'hiver sont majoritaires par rapport aux cultures en C3 de printemps. Le maïs ne domine les cultures en C3 d'hiver qu'en Bosnie.

Si les fractions relatives par PFT sont nulles (cas où CLC2000+PELCOM affiche des surfaces cultivées mais où Leff *et al.* [2004] n'en obtiennent pas), on conserve les fractions initiales dans CLC2000+PELCOM (soit 100% de C3 d'hiver, exemple en Bretagne et en Sicile). Dans le cas contraire (détection de cultures par Leff *et al.* [2004] mais pas dans CLC2000+PELCOM (Fig. 1.7a.)), les fractions relatives sont ignorées (exemple localement en Irlande, Angleterre, Alpes, Maghreb). Une fois les fractions relatives par PFT issues de Leff *et al.* [2004] appliquées à la fraction totale agricole issue de CLC2000+PELCOM, on obtient les fractions réelles par PFT agricole de la figure 1.7c., b. et d.). Ce sont celles-ci, combinées aux fractions décrites précédemment (en début de partie 1.3.3) et inchangées pour les PFT naturels, qu'on utilise désormais pour les simulations avec ORCHIDEE-STICS.

⁴⁶Food and Agriculture Organization of the United Nations

Aux différents niveaux de la préparation de cette carte de végétation (estimation de la surface agricole totale par maille, agrégation de cultures en PFT et répartition des PFT au sein de la surface agricole totale) de l'incertitude est inévitable, dûe aux hypothèses posées en amont.

Cette carte a été considérée comme fixe au cours du temps dans les simulations d'ORCHIDEE-STICS, et est représentative de l'occupation du territoire récente (dernière décennie). La présente étude n'a pas porté sur les impacts des changements d'utilisation des sols agricoles mais sur les caractéristiques du fonctionnement des surfaces cultivées, par opposition à celui de simples herbacées. Cet aspect, en attente de la fusion de plusieurs versions du modèle ORCHIDEE (celle couplée à STICS et celle dans laquelle on a codé la conservation du carbone suite à des changements d'utilisation des sols, Annexe C), fait partie de ses perspectives.

1.3.4 Pratiques agricoles

Dans les simulations avec ORCHIDEE-STICS décrites dans la section suivante, les pratiques agricoles (ou "itinéraires techniques") spécifiques à chaque espèce cultivée de STICS, ont été invariantes au cours du temps et dans l'espace (variété, date de semis et date de récolte butoir, Tab. 1.7). Certaines peuvent ne pas être renseignées; un module de calcul automatique peut alors remplacer les champs manquants : c'est le cas de l'irrigation et de la fertilisation (évoquées en partie 1.2.2.1). La quantité d'eau ou/et d'engrais apportée à la culture à chaque déclenchement, dû à un stress hydrique ou azoté franchissant le seuil défini (ici 0.85), est prescrite. Les quantités totales d'eau et d'engrais effectivement apportées aux cultures par maille n'ont pas fait l'objet ici d'une étude précise mais ont été considérées comme réalistes voire légèrement sur-estimées d'après Gervois et Vuichard (Comm. pers.). Avec cette valeur de 0.85 prescrite pour le seuil, on considère implicitement que les cultures sont conduites de façon quasi-optimale. La date de récolte n'est pas prescrite, sauf si elle atteint la date butoir, et dépend du parcours de développement de chaque culture en fonction de ses paramètres variétaux (besoins en chaleur et en froid) et des forçages. Dans le cas de la simulation initiale de référence avec ORCHIDEE Standard, aucune de ces pratiques n'a lieu d'être renseignée.

Pratique	Traitement dans ORCHIDEE-STICS
Date de semis	spatialement et temporellement fixe,
Variété	prescrite par culture
Irrigation	automatiquement calculée par STICS pour
Fertilisation	lever le stress au delà d'un seuil prescrit
Data da régulta	en fonction de la maturité ou sinon d'une
Date de lecone	date butoir prescrire par culture
Costion des résidus	laissés sur le sol après récolte (transmis à la
Gestion des residus	litière)
Interculture	Non (sol nu entre deux campagnes)

TAB. 1.7 Traitement des pratiques agricoles dans les simulations.

1.3.5 Jeux de simulations et échelle spatio-temporelle

Dans le but d'évaluer différentes caractéristiques d'ORCHIDEE-STICS (phénologie, variabilité inter-annuelle de la productivité, réponse des flux nets de carbone à l'extême climatique 2003) vis à vis de différents types de données (satellites, statistiques, atmosphériques inverses) j'ai effectué trois jeux de trois simulations. Les simulations ont été réalisées sur une même grille régulière à 0.5° de résolution couvrant une fenêtre européenne⁴⁷ de -10° à 20° Est et de 35° à 55° Nord. Ceci représente environ 1500 points de grille de terres émergées soit une surface de 2.8 millions de km^2 . Toutes les simulations se sont basées sur les mêmes paramètres de sol et carte de végétation (14 PFT), présentés dans les parties précédentes (1.3.2 et 1.3.3).

Jeu de simulations	Chapitre	Période	Spin-up	Forçage cli- matique	Données pour évaluation
$3 \times \mathbf{OS.1976}$	3	1970-1979	0	CRU	
3 × OS.1976&2003	2 & 3	1970-2003	0	CRU+NCEP	Réflectances satellites & Statistiques rendements
3 × OS.2003	4	1994-2003	10000 ans	CRU+NCEP	Inversions atmo- sphériques

TAB. 1.8 Conditions de réalisation des différents jeux de simulations.

Chaque jeu de simulations est composé de :

- **NoCROP**, une simulation de référence avec ORCHIDEE seul,
- **CROP**, une simulation avec ORCHIDEE-STICS, sans irrigation
- **CROPi**, une simulation avec ORCHIDEE-STICS, avec irrigation automatique.

Rappelons que les pratiques agricoles ne s'apliquent qu'aux simulations CROP et CROPi. Dans la simulation NoCROP, les deux PFT pseudo-agricoles initiaux (C3 et C4) ne sont, par construction, pas remplacés par les trois PFT agricoles via STICS et ne sont pas récoltés. Leur bilan de carbone s'apparente à celui des PFT naturels (Fig. 1.5**a**.).

Les caractéristiques des trois jeux de simulations sont résumées dans le tableau 1.8. Le jeu de simulations OS.1976 a été réalisé sur une période de 10 ans encadrant l'année de sécheresse européenne 1976, le jeu OS.2003 sur une période de 10 ans incluant l'année de canicule 2003 et le jeu OS.1976&2003 sur une période de 34 ans comportant ces deux années extrêmes. Les jeux de simulations OS.1976&2003 et OS.2003 ont en commun le forçage atmosphérique CRU+NCEP décrit en partie 1.3.1.1. Le forçage utilisé pour le jeu de simulations OS.1976 était basé uniquement sur les données du CRU. Le signal correspondant à l'extrême sécheresse de 1976 y est plus prononcé que dans le forçage CRU+NCEP. Les jeux de simulation OS.1976 et OS.1976&2003 ont en commun leur état initial correspondant à des réservoirs de carbone du sol vides. En revanche, ces réservoirs ont été mis à l'équilibre dans le jeu de simulations OS.2003 pour permettre l'analyse des NEP.

On entend par équilibre, celui de la biosphère avec l'atmosphère : en moyenne sur une année, les flux de CO_2 absorbé par photosynthèse compensent les flux de CO_2 dégagé par respiration. Quand la biosphère est à l'équilibre sa NEP est donc approximativement nulle. Dans la réalité peu de sites sont réellement à l'équilibre, mais l'historique de la végétation et des sols n'étant en général pas connu, l'hypothèse de l'équilibre est plus réaliste que celle du sol minéral. Cet équilibre a pu être atteint au moyen d'une longue simulation (10000 ans) forçée par les champs atmosphériques des années 1960-1970 utilisés en boucle. La répartition des PFT a été prescrite selon la carte de végétation décrite précédemment. Les réservoirs de carbone du sol se sont remplis au fur et à mesure de l'apport de litière au sol. Selon le PFT considéré, les réservoirs de carbone de la végétation atteignent un état stable plus ou moins rapidement (environ 1 an pour les herbacées, 80 pour les forêts tempérées et 150 ans pour les forêts tropicales. Le LAI dépend

⁴⁷Par la suite quand on parle d'Europe, on sous-entend "la partie de l'Europe couverte par la grille utilisée"

peu du contenu en carbone de la végétation et a un cycle stable même si les troncs des ligneux sont encore en croissance.

Les bilans hydrique et énergétique sont peu sensibles à l'état initial étant donnée la rapidité des processus dynamiques de SECHIBA. Par précaution j'ai exclu des analyses de tous les jeux de simulations les deux premières années "d'absorption" de l'état initial (correspondant à l'état final de la simulation de mise à l'équilibre dans le cas du jeu OS.2003). Pour le calcul de la moyenne climatologique dans les deux jeux de simulations "courtes", les années extrêmes 1976 et 2003 ont été écartées (moyenne sur 7 ans). Elles ont en revanche été conservées dans les simulations "longues" comparées aux statistiques de rendement, données mises à disposition sur une longue série temporelle par la FAO (chapitre 3). Les observations satellites n'étant disponibles que depuis 1982 via l'instrument à bord d'AVHRR⁴⁸ et leurs produits dérivés n'ayant été traités que jusqu'à 1999 ou 2002, c'est sur cette période plus restreinte que la phénologie d'ORCHIDEE-STICS a été évaluée (chapitre 2).

L'analyse qui a été faite de ces différentes données et des résultats de modèles est présentée de façon synthétique dans l'article qui suit et de manière plus approfondie dans les trois chapitres qu'il introduit.

⁴⁸ Advanced Very High Resolution Radiometer

Evaluation d'ORCHIDEE-STICS sur l'Europe

Article à soumettre (Avril 2008) à Global Biogeochemical Cycles

Introductif aux chapitres 2, 3 et 4

Le modèle ORCHIDEE-STICS vise à améliorer, par rapport à la version initiale d'ORCHI-DEE conçue pour représenter les écosystèmes naturels, le réalisme des simulations de la phénologie, de la productivité et du bilan de carbone des surfaces cultivées en Europe. Au sein de chaque maille du modèle, mosaïque de types de végétation naturelle et agricole, les PFT "cultures en C3 d'hiver", "cultures en C4" et "cultures en C3 de printemps" sont représentés respectivement par les paramètres du blé, du maïs et du soja. Quatre variables-clés sont transmises au pas de temps journalier de STICS à ORCHIDEE : le LAI, la quantité d'eau apportée par irrigation, l'indice de nutrition azotée et la hauteur de végétation. L'article qui suit présente l'évaluation des simulations CROP, CROPi et NoCROP vis-à-vis de plusieurs types de données. Son contenu n'est pas redondant avec les trois chapitres introduits par ses trois parties II.A, B et C.

Contents

In	troduc	tion		3		
Ι	Modelling and evaluation strategy					
	I.A	ORCHI	DEE-STICS development and potential	4		
	I.B	Simulati	on design, input data and boundary conditions	8		
	I.C	Data str	eams used for model evaluation	9		
		Satellite	e vegetation indexes	9		
		Regiona	al harvest statistics inter-annual variations	9		
		Atmosp	heric inversion results	9		
II	Moo	lel perfo	rmance and limitations	10		
	II.A	Seasona	l vegetation leaf cycle across Europe	10		
		II.A.1	Phase and amplitude simulation improvement	10		
		II.A.2	Spatial quantification of improvement	10		
		II.A.3	Discussion	13		
	II.B	Inter-an	nual variability in European crop yield	14		
		II.B.1	From NPP to yield	14		
		II.B.2	Mean yields and inter-annual variability amplitude \ldots .	15		
		II.B.3	Inter-annual variability phasing and correlations between time			
			series	17		
		II.B.4	Regional intensity of the 2003 European extreme event	20		
		II.B.5	Discussion	20		
	$\Pi.C$	2003 an	omalous European carbon source	23		
		II.C.1	Large-scale Net Ecosystem Productivity estimates	23		
		II.C.2	Seasonal development of the 2003 anomaly of NEE	23		
		II.C.3	Spatial pattern of the 2003 NEE anomaly	25		
~		$\Pi.C.4$	Discussion	27		
Co	oncludi	ng rema	rks	28		
	Prog	ess		28		
	Short	comings		29		
	Persp	ectives .		30		

European-wide simulations of present cropland phenology, productivity and carbon fluxes using an improved terrestrial ecosystem model

Pascalle C. Smith¹, Nathalie De Noblet-Ducoudré¹, Philippe Ciais¹, Philippe Peylin¹, Nicolas Viovy¹, Yann Meurdesoif¹, Alberte Bondeau³ and Bernard Seguin²

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Orme des Merisiers, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

² Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Site Agroparc, Domaine Saint-Paul, F-84914 Avignon, France

³ Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Telegrafenberg, PO Box 601203, D-14412 Potsdam, Germany

Introduction

The extension and intensification of agriculture responding to increasing demand for food and feed products has been altering the land's surface for hundreds of years [e.g. Foley et al., 2005]. Croplands and pasture presently cover $\approx 40\%$ of the land's surface ($\approx 35\%$ in Europe, pasture excluded). These observations raise the question of the contribution of cultivated land (and its evolution) to the spatial patterns and temporal variability of carbon sources and sinks as well as of biophysical feedbacks to the atmosphere. Simulation experiments of land cover change impact on biogeochemical cycling and on climate usually rely on two simple C3 and C4 unmanaged herbaceous plant functional types for the representation of the world's croplands (replacing deforested areas) [e.g., Brovkin et al., 2004; Sitch et al., 2005]. However, hybrid selection, sowing, irrigation [Boucher et al., 2004], fertilization and harvest operations imply different soil-vegetation-atmosphere flux timing and amplitude as well as soil and surface properties. Thus there is a need to account for agro-ecosystem specificities and their effect on the carbon, water and energy budgets for improving the understanding of the role of agriculture in the Earth-system. A new generation of global biosphere models now aims at including more realistic parameterizations of crop functioning and land management to quantify the biophysical (surface roughness, conductance and reflectivity) or bioegeochemical (greenhouse gas emission/sequestration from vegetation and soil) effects of modified terrestrial ecosystem characteristics. The few recent investigations of one or the other of both effects on global or regional scales include the approaches of Kucharik [2003], Osborne et al. [2007] and Bondeau et al. [2007].

In this paper we focus on agro-ecosystem specific functioning compared with natural herbaceous vegetation, previously used in ecosystem models to represent in a simple way non-forested areas disturbed by man. This natural grassland is usually characterized by a longer seasonal cycle and lower daily productivity than actual cultivated plants; In addition, it does not respond to management practices. These limitations lead to the choice of coupling the ORCHIDEE (ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms) model [Krinner *et al.*, 2005] with a crop model STICS (SimulaTeur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) [Brisson *et al.*, 1998, 2002, 2003; Brisson, 2004; De Noblet-Ducoudré *et al.*, 2004; Gervois *et al.*, 2004]. In the long term, coupling ORCHIDEE with one or several agricultural sub-models aims at i) more realistic estimates of the regional carbon and water balance of croplands forced by various past reconstructions and future scenarios of climate, land-cover and management changes, and at ii) improving the simulation of regional climate change by Earth-System models via a better description of the land surface. In the present work, Europe remains the focus of model development, evaluation and application as a representative large region of intensive temperate agriculture where relatively abundant data exist. The underlying major hypothesis is that getting the phenological development right in the model is important because all processes of carbon assimilation and allocation to plant and soil compartments, as well as water and energy exchanges over the whole growing season depend upon it. Improved representation of crop phenology via the LAI variable of a crop model is expected to make a significant difference in the accuracy of estimation of various key variables for carbon cycle modelling such as Net Primary Productivity (NPP) and Net Ecosystem Exchange (NEE).

The present study attempts to model the space-time patterns of carbon cycling across European croplands over the past thirty years, and adresses the following main questions :

- Where and when does ORCHIDEE-STICS generate a real improvement of simulation results compared with the former model version without crops?
- How realistic is the new soil-vegetation-atmosphere interface simulated by ORCHIDEE-STICS (light interception, agricultural grain production, net ecosystem carbon fluxes) with regard to available data?
- How much better are observed mean agro-ecosystem behavior, variability (seasonal and inter-annual) and response to extreme events locally and regionally captured?

We wish to reproduce faithfully geographical patterns and inter-annual variations in crop development and yield. The analysis of the multi-year response to climate variability includes extreme events such as droughts. In addition, we aim at producing reasonable estimates of the long term mean European carbon balance components for cultivated areas.

In the following, we present (section I) the modelling and evaluation strategy (using multiple data sources; for specific crops at country-level or for mosaic vegetation on a grid; on a daily, monthly or annual basis), and then analyze and discuss (section II) model performance and limitations. The main discussions are provided at the end of each result section (II.A, B & C).

I Modelling and evaluation strategy

I.A ORCHIDEE-STICS development and potential

ORCHIDEE [Krinner et al., 2005] is a spatially explicit ecosystem model which evolved from a Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer (SVAT) scheme, describing at a half-hourly time step water, energy and photosynthesis fluxes [Ducoudré et al., 1993; Viovy et al., 1997]. The model now includes a full coupling between surface fluxes and ecosystem water and carbon pools. The dynamics of carbon within each ecosystem include allocation [Friedlingstein et al., 1999], mortality and litter and soil organic matter decomposition. As most terrestrial ecosystem models, ORCHIDEE relies on the Plant Functional Type (PFT) concept to describe the vegetation diversity [Bonan et al., 2002]. PFT are distinct homogeneous vegetation cover units ignoring differences between species while concentrating on structural and functional attributes. European vegetation is described dominantly by temperate needle-leaf evergreen, broad-leaf summer-green and C3 grass PFT but also hosts a few boreal trees in the mountains as well as tropical trees on the Mediterranean coast. As a complement to these PFT standing for natural vegetation, two additional herbaceous C3 and C4 PFT used to represent agriculture. These "super grasses" differed from natural grasses only by their higher carboxylation and Rubisco regeneration rates (resp. $V_{c,max,opt}$ and $V_{j,max,opt}$ parameters) in an idealized attempt to account for greater crop productivities.

STICS is a point model able to simulate the growth and yield of diverse temperate crops on the field scale, which has been validated against local data for various cultivars at numerous sites [Brisson *et al.*, 2003]. STICS has a generic structure, where each crop type (e.g. wheat; maize) is represented by a specific set of parameter values. Some of these parameters act as choices between specific computations related to less generic processes (e.g. sensitivity to photoperiod; vernalisation requirements for winter crops like wheat; atmospheric nitrogen fixation for pulses like soybean) or between varieties (e.g. "DK250" or "DK604" for maize; "Talent" or "Thesee" for wheat) and subsequent variety-dependant parameters. STICS responds to management practices by making stress indices dependant on water input from irrigation and nitrogen input from fertilization. The model is able to compute itself irrigation and fertilizer amounts according to plant needs if real technical data is not available. Its complementary properties with regard to larger scale natural vegetation models, its structural genericity and its broad developers' and users' community made it a good candidate for coupling with ORCHIDEE [De Noblet-Ducoudré *et al.*, 2004; Gervois *et al.*, 2004].

Creating a spatially explicit version of STICS is a necessary step forward towards the coupling with ORCHIDEE, which is driven by gridded climate, soil and land cover data. We built an interface through which both models can exchange information across the whole grid simultaneously on a daily basis via a "client-server" protocol relying on the CORBA numerical technology¹. The coupled ORCHIDEE-STICS model presently considers C4 crops, winter-type C3 and summer-type C3 crops, respectively represented by the corn, winter wheat and soybean parameters of STICS (Tab. 1). These three new crop PFT have been chosen to represent a wide range of temperate crop phenologies using a limited number of categories. Within each grid cell, crop PFT coexist with natural vegetation and are each assigned a given percentage of total mosaical vegetation cover.

Table 1 summerizes how crop species are described in STICS (Tab. 1a.) and how they used to be treated as "super grasses" in the original version of ORCHIDEE (Tab. 1c.). Key variables that cannot be realistically simulated by ORCHIDEE for crops, such as **Leaf Area Index (LAI)** and **vegetation height**, or that are specific to STICS, such as **nitrogen limitation index** and **irrigation**, are assimilated into ORCHIDEE at a daily time step for each grid point. These variables integrate implicit information on sowing and harvest dates as well as on hybrid selection. In practice, ORCHIDEE, as the "client" code, calls three different STICS "servers" for all grid cells containing one and/or the other agricultural PFT. These "servers" provide the four selected variables to ORCHIDEE in exchange for climate variables. LAI in this study corresponds to the total projected one-side leaf area divided by the ground surface area covered by the plant [Asner *et al.*, 2003]. The seasonal cycles of LAI simulated for the three crop PFT accounted for in ORCHIDEE-STICS compare favorably with local LAI measurements, as demonstrated in Gervois *et al.* [2004].

The harvest date presented in table 1a. is used only to force harvest in case crop physiological maturity has not been reached in the model. Otherwise, the end of the growing season corresponds to the day when the Growing Degree-Day (GDD) requirements (Tab. 1a.) have been met. These are considered as met when the number of cumulated heat units belonging to the base-maximum mean air temperature bracket² exceeds the fixed variety-dependent threshold.

¹http://omniorb.sourceforge.net/

 $^{^{2}}$ Base (Max.) temperature is the mean air temperature above (resp. below) which degrees are considered as inducing crop development and count towards the total amount of growing degree-days needed (thermal time) to reach maturity (outside this range, degrees have no effect and development is null).

TAB. 1 – Principal parameters decribing **a.** crop species in STICS, **b.** crop PFT in ORCHIDEE-STICS and **c.** herbaceous initial pseudo-agricultural PFT ("super grasses") in Standard ORCHI-DEE.

a. STICS crop specie (variety)	Winter wheat (Talent)	$egin{array}{c} { m Maize} \ { m (DK250)} \end{array}$	Soybean	
Sowing date (day-of-year)	290	111	120	
Harvest date max. (day-of-year)	235	300	280	
$\begin{tabular}{ccc} Growing & degree-days & (above & base \\ temp.) & sowing & \rightarrow maturity \end{tabular}$	1444	1730	1480	
Base \rightarrow max. mean air temp. for development stages (°C)	$0 \rightarrow 28$	$6 \rightarrow 28$	$5 \rightarrow 25$	
Cold needs (days, opt. temp.(^{o}C))	33 (6.5)	-	-	
Base \rightarrow saturating photoperiod (h)	$6.3 \rightarrow 20$	-	$18 \rightarrow 15$	
Light extinction coefficient	0.5	0.7	0.5	
Max. vegetation height (m)	1.50	2.50	0.80	
*Min. \rightarrow max. mean air temp. for bio- mass growth (°C, opt. temp. (°C))	$0 \to 40 \ (15)$	$8 \rightarrow 42 \ (23)$	$5 \rightarrow 45 \ (30)$	
Radiation-Use Efficiency (RUE	2.2	-	-	
tDM/ha/MJ/day) f(phase : juvenile,	4.25	3.8	2.5	
vegetative, reproductive)	4.25	3.8	3.2	
b. ORCHIDEE-STICS crop PFT	C3 winter-type	C4	C3 spring-type	
Phenology parameters, LAI, vegetation height, light interception	given by STICS (sub-table a .)			
*Min. \rightarrow max. mean air temp. for photosynthesis (°C, opt. temp. (°C))	given by	STICS (sub-tal	ble a.)	
$V_{c,max,opt} \; (\mu molCO_2/m^2/s)$	120	120	120	
$V_{j,max,opt} \ (\mu molCO_2/m^2/s)$	240	240	240	
*Leaf albedo (visible and infra-red)	given by Ol	RCHIDEE (sub-	-table c.)	
c. Std. ORCHIDEE "super grass"		$\mathbf{C4}$	$\mathbf{C3}$	
Degree-days dormancy \rightarrow emergence		400	125	
Senescence temp. (^{o}C)		10	5	
Critical leaf age (days)		120	120	
LAI _{max} (m^2/m^2)		5	5	
Specific Leaf Area (SLA m^2/gC)		0.025	0.025	
Light extinction coefficient		0.7	0.7	
Max. vegetation height (m)		1.50	0.70	
*Min. \rightarrow max. mean air temp. for photosynthesis (°C, opt. temp.(°C))		$13 \rightarrow 55 \ (36)$	$-5 \to 45 (30)$	
$V_{c,max,opt} (\mu molCO_2/m^2/s)$		100	100	
$V_{j,max,opt} \; (\mu mol CO_2/m^2/s)$		200	200	
*Leaf albedo (visible and infra-red)		0.30	0.30	

^{*}In each sub-table (a., b. and c.), double lines separate phenological and architectural parameters from those used in biomass growth computation (STICS RUE model or ORCHIDEE explicit photosynthesis) and from energy balance parameters (albedo).

The accumulation of these heat units can be slowed down if vernalization³ requirements are not fulfilled and if photoperiod is not optimal⁴ (Tab. 1a.) [Monteith, 1977; Gate, 1995]. Between sowing and maturity, leaf development goes through several phases, delimited by intermediate GDD thresholds. The daily LAI increment is calculated in STICS as a function not only of heat unit sum and development phase but also of water and nitrogen limitation indices. Further details on LAI modelling are given in Brisson *et al.* [2003].

ORCHIDEE's maximum LAI and SLA parameters (Tab. 1c.) are not used anymore in ORCHIDEE-STICS (as well as the other phenological parameters) as the LAI computed by STICS is now assimilated each day (Tab. 1b.). In STICS, the amount of daily biomass increment is calculated simply by converting the absorbed Photosynthetically Active Radiation (aPAR) into above ground Dry Matter (DM) using a Radiation-Use Efficiency (RUE) factor depending on the growth stage and stress status of the crop (Tab. 1a.). In ORCHIDEE-STICS however, no use is made of STICS's RUE model because we chose to keep relying on OR-CHIDEE's process-based stomatal conductance model (Tab. 1c.). Still, the minimum-maximum temperature bracket considerd was that of STICS (Tab. 1a.) and not of ORCHIDEE (Tab. 1c.). Table 1b. shows enhanced $V_{c,max,opt}$ and $V_{j,max,opt}$ parameter values for ORCHIDEE-STICS compared with ORCHIDEE-alone "super grasses" (Table 1c.). CO₂ actual assimilation rates can be lower than these values in presence of nitrogen stress.

In ORCHIDEE-STICS, NPP is calculated just like in ORCHIDEE by subtracting each day autotrophic respiration from Gross Primary Productivity (GPP) [Farquhar & Wong, 1984], itself calculated each hour. However, GPP of a crop PFT is now constrained by a specific phenology forced by the LAI of STICS, and it relies on enhanced photosynthesis rates. The resulting shorter growing season [Gervois *et al.*, 2004] tends to reduce the cumulated annual GPP but the increased enzymatic activity under non-nitrogen-limited conditions acts in the opposite direction.

Overall, ORCHIDEE-STICS should not be considered as a mere spatialization of the original STICS model; it rather combines the major functionalities of a crop model into a global vegetation model, keeping the latter's core photosynthesis and hydrological modules active. We however currently do not account, on the European scale, for spatial heterogeneity in soil properties and management specificities. These features are specifically accounted for in STICS, when run at a particular site using local forcing data.

Site-level simulations of ORCHIDEE-STICS driven by local forcing data have allowed a first step in model evaluation against eddy-covariance flux measurement over corn and wheat in the United-States and against biomass measurements in France [De Noblet-Ducoudré *et al.*, 2004; Gervois *et al.*, 2004]. These comparisons demonstrated overall good performances of ORCHIDEE-STICS in reproducing NEE and surface energy budget variations on daily to seasonal time scales. Now, it is necessary to upscale these results to the regional and continental scales over Europe, as mentioned in introduction. For this purpose, a set of simulations have been designed and performed.

³Need for cold temperatures to switch from vegetative to reproductive phase

⁴Changing day length influences crop flowering and subsequent reproductive stages such as grain filling etc.. Some crops accumulate thermal time best when the day length exceeds a number of daytime hours threshold ("long-day" crops); others accumulate when the day length is less than a minimum threshold value ("short-day" crops). This threshold is parameterised in STICS as the "saturating" photoperiod. Base photoperiod corresponds to the number of daytime hours allowing the minimum accumulation. Between base and saturating photoperiod, accumulation of thermal time increases. Wheat belongs to the long-day crops, soybean to the short-day crops and maize day-neutral.

I.B Simulation design, input data and boundary conditions

ORCHIDEE-STICS is forced by air temperature, precipitation, air relative humidity, incident solar short-wave and infra-red radiation and wind at 0.5^{o} spatial resolution. These fields were derived from the monthly CRU⁵ 1901-2000 global dataset [New *et al.*, 2000], combined with NCEP⁶ 1940-2003 re-analyses into daily values [Kalnay *et al.*, 1996], and then extrapolated into hourly values using a weather generator. The rising global atmospheric CO₂ concentration was also used to force ORCHIDEE-STICS. Soil is characterized by a map of color properties needed for albedo calculations. Soil forcing for STICS, based on a different nature of parameters (%sand, %clay, %silt) [Brisson *et al.*, 1998], was independent and remained constant (values taken from the typical rich soils of the Paris Basin).

We use a global present land cover map at 0.5° resolution, containing maximum fractions of grid cell coverage by each one of the 12 PFT found in Europe, the last three being the agricultural types. This vegetation map remained unchanged during the whole simulation period. The first PFT corresponds to all-year-long bare soil. For light interception, transpiration and assimilation, energy and water balance calculations, the bare soil seasonal extent can increase as the other PFT have a daily coverage ranging from 0 to their maximum prescribed fraction. Non-vegetated surfaces (sea, ice) were taken out in producing average fields. Starting from a land-cover map combining CORINE⁷ [Büttner et al., 2004] + PELCOM⁸ [Project, 2000], projected into the PFT of ORCHIDEE, the total agricultural fraction was attributed to our three crop PFT by aggregating the 18 crop categories of Leff et al. [2004] into C4, winter-type C3 and spring-type C3. In case of discrepancies between the total agricultural coverage given by Leff et al. [2004] and CORINE+PELCOM, it was assumed that the latter is closer to reality and so the former dataset was used as a provider of relative crop fractions. When no information was available in Leff et al. [2004] (e.g. for, some grid cells in Brittany, French Massif Central and Sicily), we kept previously available information on C3/C4 crop ratios from De Noblet-Ducoudré et al. [2004] thus losing only potential spring C3 coverage information.

Agricultural practices (present levels) are fixed as being spatially homogeneous over Europe. For example, wheat (Talent cultivar) is sown on day 290 all over Western Europe (Tab. 1). The automatic irrigation and fertilization modules of STICS were switched on, thus providing the crops, in order to cancel out the stress, with a prescribed amount of water and nitrogen when supply falls below 90% of the demand. Note that the total (annual integrated) amounts of water and nitrogen input to crops is not fixed. The ORCHIDEE-STICS soil water pools are in an initial state corresponding to saturation whereas the litter and soil carbon pools are initialized as being completely empty. The latter are brought to equilibrium, for analyses of net carbon flux exchanges with the atmosphere, via a spin-up simulation of 10,000 years, repeating the 1970 year climate.

The model European domain considered is bounded by -10° to 20° in longitude and 35° to 55° in latitude (*i.e.* 1506 terrestrial grid cells, $2,756,000km^2$ of land). The period of interest is 1972-2003, including extensive droughts such as 1976 and 2003, which will be discussed further in this paper. In addition to a simulation with ORCHIDEE alone (NoCROP), two model experiments were performed using ORCHIDEE-STICS with irrigation (CROPi) and without (CROP). The output fields from each simulation were archived at a daily time-step.

⁵Climate Research Unit

⁶National Center for Environmental Predictions

 $^{^7\}mathrm{CORINE}$ Land Cover 2000

⁸Pan-European Land Use and Land Cover Monitoring

I.C Data streams used for model evaluation

The modeled seasonal, inter-annual and spatial patterns of radiation interception were tested (via the LAI variable) against remote sensing observations. The inter-annual regional productivity distribution was tested (via yield derivation) against national and sub-national level crop harvest statistics. The continental-scale seasonal carbon flux anomalies were compared with atmospheric inversion estimates. These datasets are briefly described below.

Satellite vegetation indexes

The 1982-2002 monthly maximum LAI dataset used was derived from the NOAA-AVHRR original Land dataset, provided by the Global Inventory Monitoring and Modelling Studies (GIMMS) group at 0.25° spatial resolution [Myneni *et al.*, 1997]. LAI is given as one single value for the whole 0.25° grid cell whereas it is simulated in ORCHIDEE-STICS separately for each PFT but at 0.5° . We hence aggregated PFT daily values according to their relative cover fractions in the vegetation map. Observed values were aggregated spatially to fit model outputs resolution.

Regional harvest statistics inter-annual variations

We used national statistics assembled by the FAO [FAO, 2007] datasets for crop yields and cultivated areas in Europe from 1961 to 2003. Only wheat and maize growing in France, Spain, Italy, Germany and Austria were considered. A long-term positive trend in yield can be observed for both crops in all countries. The average increase is of +0.15t/ha/year, equivalent to almost a tripling during the last 45 years. We are only interested here in the climate driven inter-annual variability. Hence, the trend, which mostly reflects agricultural intensification and improved farmers' practices [Gervois *et al.*, 2008; Lobell & Asner, 2003; Goudriaan *et al.*, 2001], was fitted with a linear curve and removed from the data. This means climate and CO₂ minor contribution to this trend were ignored, although their effects are taken into account in the simulations.

Atmospheric inversion results

No measurement of regional-scale net carbon fluxes exists. Available observations are sitelevel measurements (e.g. flux towers), representative only of local fluxes ($<1km^2$). Regional flux estimates can be derived from modelling of spatially heterogeneous biosphere gross fluxes and from source/sink pattern reconstruction via inverted atmospheric transport and CO₂ concentration measurements [Enting & Mansbridge, 1989].

Atmospheric inversions estimate a distribution of surface CO_2 fluxes which best match a set of atmospheric concentration measurements within their uncertainty. The spatial resolution of inversions is limited by the sparseness of the atmospheric network, and by unknown biases in transport models [Gurney *et al.*, 2002; Stephens *et al.*, 2007]. The spatial resolution at which CO_2 fluxes can be safely diagnosed globally is on the order of 1,000 to 5,000*km*, much coarser than the grid of ecosystem models.

We compared the ORCHIDEE-STICS CO₂ fluxes with inverse model results for the whole European domain. Given the large coverage of crops over the European continent ($\approx 40\%$ according to Ramankutty & Foley [1999]), accounting for them in an ecosystem model should induce sufficiently large differences in NEE (*i.e.* phase and amplitude of the seasonal cycle or response to climatic extremes) to be distinguished by the atmospheric network. However, we will only compare the flux anomalies as these are much more robust than the long term mean fluxes [Ba-ker *et al.*, 2006; Bousquet *et al.*, 2000].

Two sets of "high-resolution" inversions were used, further refered to as "LSCE" and "JENA", where fluxes are solved over the 1994-2003 period on the transport model grid resolution. They follow from the initial studies of Peylin *et al.* [2005] and Rödenbeck *et al.* [2003] respectively, with a few recent improvements. They are entirely independent based on different transport models (LMDz and TM3 with horizontal resolution of $2.5^{\circ} \times 3.75^{\circ}$ and $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ respectively) and different prior information (*i.e.* biospheric fluxes, errors...) although they share most atmospheric stations.

II Model performance and limitations

II.A Seasonal vegetation leaf cycle across Europe

II.A.1 Phase and amplitude simulation improvement

Generally, the modeled LAI shows a more periodic cycle and a shorter growing season in ORCHIDEE-STICS compared with the standard ORCHIDEE version. Implementing crops strongly improves model agreement with the satellite remote-sensing GIMMS data over croplands in Europe. Figure 1 illustrates this point for five selected highly agricultural regions during five consecutive years selected from the 1982-2002 observed period. Irrigation (mainly applied to summer crops) was found to have almost no impact on integrated vegetation LAI. Therefore, only the non-irrigated ORCHIDEE-STICS simulation (CROP) results were shown in this section.

At all locations, the phase agreement between modeled and remotely-sensed LAI is improved from NoCROP to CROP : the May-June LAI peak is better captured as well as the beginning and ending of the growing season. The LAI of the "super grass" herbaceous PFT used to represent C3 crops in the standard ORCHIDEE version shows a peak later in the season and unrealistically strong year to year variations. It may be noticed that model/data discrepancies occur in winter in all selected regions; indeed a winter peak is present every year in the satellite data for Beauce, in the North of France (Fig. 1c.) and Great Britain (Fig. 1a.). The satellite data indicate a longer growing season in Aquitaine, in the South-West of France (Fig. 1d.), than in Beauce (Fig. 1c.), with, for example, two maxima respectively in May and July during the year 1997. A realistic double LAI peak is also produced by the CROP simulation but it is much sharper than in remote-sensing data. The observed LAI never reaches 3 whereas simulated LAI can increase up to 5. More spatial variability (between selected regions) is present in the satellite fields than in the CROP simulation, but the situation is opposite for inter-annual variability.

II.A.2 Spatial quantification of improvement

In order to quantify the improvement of modelled LAI over Western Europe through the coupling of STICS to ORCHIDEE, we computed Figure of Merit in Time (FMT) values [e.g. Krinner et al., 2005], for the 1982-2002 mean simulated LAI cycles as compared with the monthly observed cycle averaged over the same period. We derived from the daily simulated series a monthly series reporting the maximum LAI of each month, since the remote-sensing retrieval algorithm is designed to retain the highest vegetation index of each month [Holben et al., 1986]. Only the period from February the 15th to November the 15th was considered in order to discard the overestimated observed values in winter in oceanic climate zones because of the high soil humidity. FMT improvement from the NoCROP to the CROP simulation over the European continent is shown in figure 2 as the difference FMT_{CROP}-FMT_{NoCROP}, for grid cells with more than 50%



F1G. 1 – Aggregated LAI (m^2/m^2) simulated by Standard ORCHIDEE (NoCROP : green) and ORCHIDEE-STICS (CROP : red) for a mosaic of vegetation including A% agriculture, compared with LAI derived from GIMMS satellite measurements (black) on selected 0.5×0.5 degree grid cells in **a.** United Kingdom, **b.** Germany, **c.** France (Beauce), **d.** France (Aquitaine) and **e.** Spain over the 1996-2000 period.



FIG. 2 – Figure of Merit in Time (FMT) computed from the 1982-2002 mean 15 Feb.-15 Nov. LAI observed cycle and **a.** simulated by Standard ORCHIDEE, **b.** simulated by ORCHIDEE-STICS, for each European grid cell comprising more than 50% agriculture. **c.** is the difference between both computations. The red color indicates model-data agreement improvement.

crop cover.

The resulting map (Fig. 2c.) shows a striking improvement of the LAI simulation all over European croplands (except inland Croatia). FMT values have doubled thanks to the crop modelling, from on average 0.3 in NoCROP (Fig. 2a.) to 0.6 in CROP (Fig. 2b.). This improvement is generally proportional to the fractional coverage of croplands.

II.A.3 Discussion

The Standard version of ORCHIDEE is inappropriate for reproducing the functioning of croplands because plant growth for grassland PFT is driven by a perennial phenology, and it is hence too sensitive to soil moisture levels all year long. Implementing a crop specific phenology better constrains the timing of leaf expansion according to farmers' sowing and harvesting decisions (though these dates are in our case spatially and temporally invariable), thus allowing a better fit to observed data in terms of phasing and growing season length (Fig. 1).

Even if it is expected that winter vegetation index observations would be positively biased due the retrieval algorithm (Fig. 1a. & c.), the LAI values simulated with ORCHIDEE-STICS for winter remain under-estimated. Natural and farmer's rotation and intercropping choice dependant re-growth of vegetation after harvest is currently not accounted for in our model. On the other hand, summer LAI values are bound to be under-estimated in the satellite-derived dataset because of saturation or light interception efficiency at high LAI [Gower *et al.*, 1999].

The early summer LAI fast increase is well captured by ORCHIDEE-STICS, thanks to the implementation of a winter-type C3 crop PFT. The second peak appearing in late-summer corresponds to the maximum development of both C4 and spring-type C3 crop PFT. These LAI peaks are sharper in the simulations, where a fixed unique date of harvesting and sowing for each crop PFT abruptly changes its share of the LAI of an entire 0.5° grid cell, than in the remotely sensed observations, affected by local field-scale variability in the leaf onset and termination dates. The double summer peak in the observed LAI over Aquitaine (South-West of France) confirms however that the simulated two-phase structure of the growing season is realistic (Fig. 1d.).

A late-summer secondary LAI peak is not observed for example in Beauce (Fig. 1c.) and Spain (Fig. 1e.). This reminds us that the aggregated simulated LAI depends on the relative contributions of, among others, the three agricultural PFT and suggests that the model should rely on a good map of these fractions. In our case, the lower proportion of maize relative to winter crops in Northern areas in reality is not accounted for in the input land cover map to OR-CHIDEE, thus being possibly responsible for a locally unrealistic late-summer peak. This land cover map considers relative crop fractions at national level. Differences between regions in the fractional coverage of each crop arise only from total agriculture percentage, given at a finer level.

Discrepancies between model and data in inter-annual variability can be due to the following reason : agricultural land use changes every year in reality (and satellite observes it) following a rotation plan including winter-type as well as spring-type crops whereas prescribed land cover remains constant in the simulation. Crop rotations should compensate each other inside a 0.5° grid cell but abrupt changes in land allocation to certain types of crops depending on economic incentives or extreme events have an impact on a broader scale and these are not taken into account at the moment in the vegetation map.

On the European scale, implementing crops in ORCHIDEE induces a major improvement of
LAI, as demonstrated by the spatial evaluation against remote-sensing data (Fig. 2). We found an apparent degradation of model-data agreement in only a few areas. The "super grass" C3 herbaceous PFT indeed has, over a 20 year average, a rather smooth cycle artificially advantaging Standard ORCHIDEE (NoCROP) in the FMT_{CROP} -FMT_{NoCROP} comparison, although its reproduction of crop phenological development is quite bad every year. Soybean, the crop standing for the spring-type C3 PFT in ORCHIDEE-STICS, and typically showing a LAI with a high amplitude and a short cycle, may not be best representative of European agriculture together with wheat and maize.

In summary, uncertainty sources include on the model side : vegetation map issues, attribution of crops to categories, choice of STICS crop server to represent the category and resolution of simulation; and on the observed data side : the satellite remote measurement from instrument, data treatment and LAI derivation. Despite these problems ORCHIDEE-STICS satisfactorily captures the main agricultural signal.

II.B Inter-annual variability in European crop yield

II.B.1 From NPP to yield

Given the availability of national level crop yield statistics, reported in grain Fresh Matter (FM) mass per unit surface area, we express simulated productivities, aggregated per crop and country, in tons of grain FM / Ha. In STICS, the yield is gradually elaborated during the grain filling phase, by allocating DM to the grain compartment as a function of growth stage and stress [Brisson *et al.*, 2003]. In ORCHIDEE-STICS, there is no realistic filling of a grain reservoir even though the model allows for "fruits" and "reserves". In order to diagnose yield from simulated NPP (cumulated over the growing season) we combined information from the literature [Goudriaan *et al.*, 2001; Saugier *et al.*, 2001] and STICS outputs by writing :

$$Yield = f \times HI \times d \times ANPP \tag{1}$$

where the yield is expressed as the product of a Harvest Index (HI : grain to above-ground)biomass ratio) with above-ground NPP $(ANPP = a \times NPP)$. d and f are tow coefficients converting respectively carbon mass (gC/m^2) into DM mass (tDM/Ha) and DM mass into FM mass. The crop specific a, d and f coefficients were derived from those given by Goudriaan et al. [2001]; Saugier et al. [2001], who estimated NPP from yield. HI values were derived from STICS for each crop and country over the period 1972-2003 in both irrigated and non-irrigated simulations. The HI values applied to the CROP and CROP isimulated NPP range from 0.23 to 0.37 for winter wheat and 0.49 to 0.68 for irrigated maize. Water limitation tends to increase HI in the model, as is generally observed. The HI derived from the non-irrigated STICS simulation were applied to the NoCROP NPP results. Estimates of HI by STICS differ from the generic estimates of 0.42 for wheat and 0.45 for maize of Goudriaan et al. [2001]; Saugier et al. [2001]. Values for Germany are the closest to these generic coefficients. A distinct latitudinal gradient was observed for both crops : wheat HI decreases with decreasing latitude, while maize HI has an opposite behavior. These gradients result partly from climate and partly from the homogeneously fixed technical parameters, whereas in reality agriculture aims at adapting management to pedoclimatic conditions. In this analysis we did not use STICS yields directly (relying on a different biomass production and allocation computation) because we need an approach consistent with the NoCROP simulation for comparison and with the productivity calculations made for the other PFT for further integrated carbon balance estimation. Note that "yields" estimated from the NoCROP simulated NPP are based on productivity cumulated over the entire growing season, and not only on the season delimited by sowing and harvest in the CROP and CROPi simulations.

II.B.2 Mean yields and inter-annual variability amplitude

Figure 3(a.-d.) shows the 1972-2003 mean crop yields and their temporal standard deviation (expressed in % of the mean). The results from the three model experiments are compared with FAO data for 5 representative countries growing wheat and maize on the surface areas presented in table 2. The surface areas considered in the ORCHIDEE-STICS are larger than in the FAO data, especially for wheat. This comes from the fact that several different crop species have been aggregated into the model crop PFT "winter-type C3", such as wheat, barley, rapeseed, all represented by the common set of wheat parameters.

TAB. 2 – Crop cultivation surface areas $(10^6 Ha)$ considered in the model vegetation map for the winter C3 and C4 PFT compared with those reported in FAO ProdStat data for wheat, maize and aggregated cereals, for the beginning (in brackets) and end of the period studied, given for five European countries.

Crop surface area (10^6Ha)	France	Spain	Italy	Germany	Austria
Model generic winter C3	10.8	3.2	3.7	6.4	0.6
FAO 2003 (1972) wheat	4.9(3.9)	2.4(2.0)	2.3(2.4)	3.0(2.5)	$0.3\ (0.3)$
FAO 2003 (1972) all cereals*	8.9 (9.7)	6.6(7.5)	4.1(5.3)	6.8(7.6)	0.8(1.0)
Model generic C4 (maize)	3.1	0.6	1.3	0.6	0.3
FAO 2003 (1972) maize	1.7 (1.9)	$0.5 \ (0.5)$	1.2(0.9)	0.5(0.1)	0.2(0.1)

*Aggregated cereals comprise barley, triticale, oat, rye, millet, sorghum, paddy rice, buckwheat, wheat and maize.

Mean wheat yields (Fig. 3a.) simulated by ORCHIDEE-STICS are in overall good agreement with the observed values (4.7-5.9tFM/Ha +/-23%). However modelled yield is over-estimated in Southern European countries (Spain, Italy). STICS-alone yields (not shown) are very similar to ORCHIDEE-STICS, thus indicating that there is nearly no difference in biomass production between both models. Relative inter-annual variability (the so-called Coefficient of Variation : Cv = standard deviation divided by mean) in ORCHIDEE-STICS wheat yields as a response to climate fluctuations remains reasonably low (below 18%) in agreement with the data ($\approx 10\%$ across Europe) except for Germany and Austria, where it reaches 40% (Fig. 3c.). Irrigation was found to have almost no impact on the simulated wheat mean yields, and to slightly dampen variability in the two Eastern countries. This behavior is realistic since wheat gowth does not suffer from strong water stress. Therefore we only discuss non-irrigated model results (CROP) for wheat herafter.

On the contrary, irrigation has a strong effect on maize yields, increasing the mean (Fig. 3b.) and reducing the relative inter-annual variability in ORCHIDEE-STICS yields by up to 60% in Spain (Fig. 3d.). This effect is larger in drier Mediterranean countries like Spain and Italy than in temperate ones, which receive more rainfall during the summer. The irrigated simulation CROPi is expected to be the most realistic one both in terms of mean yields and of variability amplitude, even if it still under-estimates maize yields, mainly in the two Mediterranean countries (according to FAO observations). Remarkably, despite very contrasted conditions, the FAO maize yields take very similar values between southern and temperate regions, and vary within a rather narrow range of 6.2 to 8 tFM/ha. This may result from variable levels of irrigation inputs needed to fulfill plant needs. Although the CROP simulation has its water limitation in common with the NoCROP one (no irrigation in both simulations), the mean yield estimated in NoCROP is overall closer to the simulated values for irrigated maize (CROPi). Spain and Italy show an unrealistically high variability in the CROP simulation (Fig. 3d.).

For each of the three simulation results presented in figure 3b. and 3d. (maize), glancing



FIG. 3 – Yield mean (tFM/ha) and relative inter-annual variability (Std.Dev./Mean) simulated for wheat (resp. **a**. and **c**.) and maize (resp. **b**. and **d**.), by Standard ORCHIDEE (NoCROP : green), ORCHIDEE-STICS irrigated (CROPi : blue) and non-irrigated (CROP : red), compared with FAO statistics (black) for five European countries over the 1972-2003 period. **e**. variability = f(mean) relationships found for maize. **f**. corrected variability estimates for maize using these relationships.



FIG. 4 – Correlation coefficients between yields reported in the FAO data and simulated by Standard ORCHIDEE (NoCROP : green), ORCHIDEE-STICS non-irrigated (CROP : red) and irrigated (CROPi : blue) for **a.** wheat and **b.** maize, for the five European countries over the 1972-2003 period.

through all results suggests that countries with a lower average yield also experience a higher relative inter-annual variability. The relationships between the simulated Cv and mean maize yields are given in figure 3e. $(0.80 < R^2 < 0.97)$. The same kind of relationships was found in STICS-alone results (not shown), though the mean yields were higher, thus indicating a divergence in biomass production unlike for wheat. These relationships found for maize do not hold for wheat, the variability of which is generally lower than that of maize because of the lower exposure of winter crops to the summer water stress. Such a relationship does not appear in the FAO data, for which the variability remains below 10% in all five countries. Obviously, low modeled yields, far from the potential yield, are more sensitive to the different growth factors, all the more as the agricultural practices are, in the model, locally not adequate compared with reality. For maize, since ORCHIDEE-STICS always both over-estimates the variability and under-estimates the mean yield, we corrected the simulated variability assuming a model bias tightly linked to the bias in the mean yield according to figure 3e. We thus produced a corrected set of variability estimates by normalizing the model mean yield so as to match the FAO observed mean yield in each country. The corrected variability estimates for maize (Fig. 3f.) reveal a fairly homogeneous pattern across the five countries : the standard ORCHIDEE version gives the highest Cv ($\approx 27\%$), then comes ORCHIDEE-STICS without irrigation ($\approx 21\%$) and finally ORCHIDEE-STICS with irrigation (13%), still slightly over-estimating observed variability.

ORCHIDEE-STICS captures the mean yields of both wheat and maize in temperate countries better than in Mediterranean regions. In temperate countries (Germany, Austria), it brings a strong improvement as compared with ORCHIDEE without crops, which over-estimates the yield. France is the country where the coupled model performs best for both crops and in terms of mean as well as of relative inter-annual variability amplitude with respect to FAO data.

II.B.3 Inter-annual variability phasing and correlations between time series

Figure 4 gives the correlation coefficients (R) between yields resulting from all three simulation experiments and the FAO data for wheat and maize. The model-data correlation is always (except in Spain) higher for maize (Fig. 4b.) than for wheat (Fig. 4a.). The CROP simulation always outperforms NoCROP in the comparison with the FAO historical yield data, except for wheat in Germany. This improvement in the phase of inter-annual yield variations was not detectable in the Cv values. For instance, for wheat in France, Spain and Italy, ORCHIDEE-STICS



FIG. 5 – Normalized yield ((Yield-Mean)/Std.Dev.) 1972-2003 series simulated by ORCHIDEE-STICS non-irrigated (CROP : red) and irrigated (CROPi : blue) compared with FAO data (black) for maize in **a.** France and **b.** Italy.

and Standard ORCHIDEE give similar Cv values (Fig. 3c.) but the correlation is better with ORCHIDEE-STICS. This is also the case for wheat in Austria (better model-data correlation using the CROP simulation results), even if the coupled model over-estimates variability amplitude more than the standard version does (Fig. 3c.). Concerning maize (Fig. 4b.), irrigation improves the correlation between simulated and observed yield time series in Italy but has the opposite effect in France while it does not make much difference in Germany and Austria. As expected, values for NoCROP are usually closer to those for CROP than to those for CROPi.

Figure 5 compares the normalized anomalies of yield time series (relative to the 1972-2003 mean and divided by their standard deviation) simulated in the CROP and CROPi experiments with that of the FAO detrended time series, for the two largest maize European producers, France and Italy (Tab. 2). As mentioned above in the correlation analysis, ORCHIDEE coupled with STICS reproduces most of the inter-annual climate-driven yield fluctuations reported by the FAO. Especially one can observe a large drop in yield in 1976 in France (Fig. 5a.) but not in Italy (Fig. 5b.), while in 2003 both countries were affected. These features are well reproduced by the model. The difference between the two drought years can be explained by the spatial pattern of the climate anomalies : the center of action of the pronounced 1976 drought (Fig. 6a. & c.) was the North of France (-400mm cumulated Jan.-Aug. precipitation deficit), whereas the one of the 2003 heat wave ($+6^{\circ}C$ average Jun.-Aug. temperatures) spreaded over France, Northern Italy, Southern Germany and Austria (Fig. 6b. & d.).



FIG. 6 – Mean ambient air temperature (May-Jul. or Jun-Aug. ^{o}C) and cumulated precipitation (Jan-Aug. mm) forcing anomalies in the contrasted years 1976 (resp. **a.** and **c.**) and 2003 (resp. **b.** and **d.**).

II.B.4 Regional intensity of the 2003 European extreme event

Figure 7 compares the regional pattern of maize normalized yield anomaly due to the 2003 heat wave event observed in the FAO data with the one simulated in the CROP and NoCROP experiments. France, Italy, Germany and Austria were all strongly affected, and suffered a yield loss as high as four times the standard deviation (-4σ) , according to the data. In contrast, maize yields in Spain were not significantly reduced. The CROP simulation shows a similar pattern of yield drop, though slightly less dramatic, locally reaching -3σ . In addition, the coupled ORCHIDEE-STICS model produces a yield anomaly pattern which is very well correlated to the 2003 summer temperature anomaly pattern (Fig. 6b.). The simulation carried out without crops (NoCROP) shows a less realistic spatial distribution. The C4 "super grass" PFT, though not irrigated, seems to take advantage of the warm temperatures in North-Eastern Europe in 2003. NPP as well as yields simulated by Standard ORCHIDEE for this PFT in Germany and Austria increase during the summer of 2003, which is an unrealistic behavior with respect to FAO data showing a drastic drop in both countries.

II.B.5 Discussion

The over-estimation of modelled winter wheat yield in Spain and Italy (Fig. 3a.) probably results from the fact that wheat does not suffer enough from high temperature and water stress in the model. Processes like "scalding", which are not yet accounted for in the version of STICS used for coupling, may be the cause of the over-estimated yields by ORCHIDEE-STICS. Additionally, winter wheat was historically developed to allow a longer growing season and related higher biomass accumulation than spring wheat. Spain and Italy take advantage of warm springs since the French cultivar used to parameterize wheat across the whole of Europe demands only a few chilling days for satisfaction of vernalization needs. Germany and Austria, on the contrary, in reality grow wheat varieties demanding a longer vernalization period. In the model, the development of an ill-adapted French variety is therefore slowed down and wheat is more exposed to stresses during critical growth phases, which may be the cause of the higher inter-annual variability in these North-Eastern countries (Fig. 3c.). Inversely, the growing conditions in Germany and Austria seem to be too favorable for the herbaceous C3 and C4 PFT of ORCHIDEE without crops.

The severe under-estimation of maize yields by ORCHIDEE-STICS, related to a low biomass production in Spain and Italy (Fig. 3b.), is primarily due to a light interception deficit induced by a low LAI. The second reason is a CO_2 assimilation efficiency deficit, resulting mostly from the use of photosynthesis or water balance parameters not adapted to Mediterranean conditions. Water stress can be suppressed when maize is cultivated with irrigation support (CROPi), but the French maize cultivar used in this modelling study to represent European maize is not resistant enough to high temperatures of Mediterranean regions. The C4 "super grass" PFT in Standard ORCHIDEE even goes extinct after 20 years simulation on part of the cultivated area of France and Spain, thus lowering the mean production estimate over the country and the period, and bringing it artificially closer to the observed value in the case of France. The usually lower maize yield simulated in CROP compared with NoCROP comes from the shorter growing season forced by STICS through sowing and harvesting dates. This effect, dominating that of the higher maximum LAI for crops (not always reached) and higher photosynthesis efficiency values, induces a lower maize NPP cumulated over the year in CROP than in NoCROP. The higher inter-annual variability observed for C4 "super grass" NPP when no crops are accounted for in ORCHIDEE (Fig. 3d. & f.) results from the higher variability in LAI seasonal cycle (see section II.A.).

The low inter-annual variability in both maize and wheat yields in the FAO data (Fig. 3c.-d.)



FIG. 7 – Intensity (normalized yields) of 2003 extreme maize yield drop reported in the FAO data a. compared with that simulated by Standard ORCHIDEE b. and ORCHIDEE-STICS c. for each European grid cell comprising more than 25% agriculture.

78

may be due to the fact that these harvest statistics are collected mostly from large exploitations, more adaptive than smaller ones, thus smoothing the temporal (as well as spatial) variability of yields. In addition, the FAO data are based on variable but real contributing areas from year to year, where growing failures are not accounted for because the land might have been re-affected to another use during the cycle whereas all modeled yield losses are counted.

Our simulation protocol with STICS keeping agricultural practices such as sowing date, hybrid selection spatially homogeneous across Europe and over years can cause the general overestimation of the modelled relative inter-annual yield variability (Cv) with respect to FAO records (Fig. 3c.-d.). In reality practices are carefully chosen by farmers to adapt optimally to local climatic conditions, when no particular incentives influence their decision in favor of another factor than profitability, generally directly correlated to yield. This adaptation is accounted for in the FAO statistics, whereas ORCHIDEE-STICS artificially grows wheat and maize according to an inflexible calendar, and therefore increases yield loss occurrences. In addition, farmers choose the best suitable soils whereas soil texture is prescribed in our simulations to an average spatial property.

The more realistic phase of inter-annual yield variations simulated by ORCHIDEE-STICS (non-irrigated) than by ORCHIDEE without crops (Fig. 4a.-b.) indicates that the productivity response to climate variability is improved when accounting for crop specificities (more realistic phenology). The fact that the values of the correlation coefficient (R) remain quite low (Fig. 4a.) can be due to the comparison of simulated winter wheat yields with FAO wheat yields actually aggregated from spring and winter-type varieties. In the case of maize (Fig. 4b.), there is no such winter to spring-type gradient, we consider only grain maize and not silage maize. Irrigation can reverse the response to a climate anomaly by letting a crop take advantage of warmer temperatures without any water limitation (Fig. 5a.-b.). Depending on the country considered, the data is better correlated to the simulation with irrigation (Italy) or without (France). Using a realistic fraction of irrigated crops would combine the two series and improve the final correlation in both cases.

Absolute yield anomalies (not shown, Smith [2008]) simulated for maize by ORCHIDEE-STICS in 2003 in France, Germany and Austria (CROP simulation) are equivalent in amplitude to that reported in the FAO data. However, the absolute simulated standard deviation is about twice as large as observed, hence the intensity (normalized anomaly : anomaly/Std. Dev.) of the response to the event is reduced (Fig. 7a. & c.). The model indeed simulates other yield anomalies that do not appear in the FAO data; this points out to the over-estimated sensitivity of ORCHIDEE-STICS of ORCHIDEE-STICS forced by homogeneous agricultural practices. The performance of ORCHIDEE-STICS still remains much better than that of ORCHIDEE without crops, which shows a much too low NPP reduction and even a NPP increase over some regions (Fig. 7b.). The intensity of the yield drop of irrigated maize in 2003 (not shown) is locally as high as reported in the FAO statistics, because of a lower standard deviation than non-irrigated maize, but also locally negative (yield increase). This patchy pattern suggests that irrigation cannot prevent the crop from all damages and reminds that the 2003 summer was characterized by extreme temperatures and not only by drought. The crop must have been growing in conditions at the limit of its resistance.

In order to improve the model-data comparisons for yields, aggregation of simulated yields over Europe could be done using EUROSTAT regional level data for cultivated areas per crop, which should sum up to FAO country level data.

II.C 2003 anomalous European carbon source

II.C.1 Large-scale Net Ecosystem Productivity estimates

We now discuss the net carbon flux exchanged between the atmosphere and the biosphere (expressed so that negative values indicate a biosphere sink). On coarse spatial scales, NEE can be independently estimated by atmospheric synthesis inversions based upon atmospheric CO_2 concentration gradients (see section I.C). Bottom-up NEE estimates can be produced from the difference between NPP and soil heterotrophic respiration computed by ecosystem models. NPP being calculated separately for natural or agricultural vegetation types in ORCHIDEE-STICS. we took the average value weighted by the relative fractional area of each PFT. Heterotrophic respiration is computed by summing up CO_2 emissions from all the litter as well as soil carbon pools. These carbon pools receive input only from non-harvested NPP for cultivated vegetation, the harvest being exported away from the ecosystem. On a European scale, however, we have to account for agricultural products being consumed, releasing back CO_2 to the atmosphere. We assumed the crop harvest to be respired within one year, that is 1/365 of the harvest returns to the atmosphere each day. Accounting for this source to match the carbon budget makes land fluxes estimated by top-down synthesis inversions consistently comparable to the CROP bottomup estimates. Inversion and ecosystem model estimates of NEE (computed at different spatial and temporal resolutions) were aggregated over Europe for comparison.

Figure 8a. compares the modeled seasonal variation of European NEE averaged over 1996-2002 with the variation in 2003. In order to make interpretation of these results independent of model spin-up simulations (*i.e.* for the initial carbon pools size), we subtracted, for each simulation (CROP, CROPi and NoCROP), the long-term mean NEE value both from the 1996-2002 average and 2003 extreme year cycles. Figure 9 shows the spatial distribution of the 2003 NEE anomaly cumulated over May to October. Finally, figure 10 compares European NEE anomalies over 1996-2003 between the 3 bottom-up simulations and 2 inversion model results.

II.C.2 Seasonal development of the 2003 anomaly of NEE

The typical Northern hemisphere seasonal pattern of NEE, with carbon uptake during the growing season and release otherwise, can be observed in all three ORCHIDEE-based simulation experiments on figure 8a., combining natural and agricultural vegetation (resp. 60% and 40 % of Europe's vegetated surface area [Ramankutty & Foley, 1999]). Even if 2003 has entered on record by its summer heat wave, we show that in all cases (CROPi, CROP and NoCROP) the divergence between the 2003 and the mean NEE already appears at the end of April, reducing the amplitude of the spring carbon uptake (NEE in May 2003 is (in absolute) less than -5TgC/day instead of -6.5TgC/day during 1996-2002. The 2003 NEE seasonal curve converges again "to normal" values in October in both CROP and CROPi simulations (Fig. 8a.). In the NoCROP simulation, the end of the growing season occurs two months earlier in 2003 (*i.e.* by around mid August) than normal, with heterotrophic respiration being the dominant process after August (after NPP has collapsed to almost zero values [Ciais *et al.*, 2005]). In contrast, the mean NoCROP NEE over 1996-2002 shows a longer growing season with NPP lasting up to November (not shown).

Summer crops are responsible for the second peak in NEE around August in the CROP and CROPi simulations (Fig. 8a.). This peak is less visible in 2003 (especially in the case without irrigation) and is not present in the NoCROP simulation. Irrigation starts impacting on cropland NEE by June, slightly earlier in 2003 than during 1996-2002, when summer crops like maize are in their maximum growth phase. Net carbon uptake is generally enhanced by irrigation (+30% over May-October and Europe), due to a +17% NPP increase dominating over a +14% respiration increase (not shown, Smith [2008]). Irrigation stops at maize harvest, which has apparently



F1G. 8 – Seasonal cycle of NEE cumulated over Europe (TgC/day) for the ORCHIDEE-based experiments NoCROP (green lines), CROP (red lines) and CROPi (blue lines). **a.** normalized values for the year 2003 (plain lines) vs. the 1996-2002 mean (dash lines). **b.** 2003 anomalies. For ORCHIDEE and ORCHIDEE-STICS NEE, we accounted for smaller contributing surface areas along the coast and non-vegetated areas such as glaciers in the Alps. For Inverse NEE only a land-sea mask at coarser resolution applies.

no persistent effect on soil respiration.

Figure 8b. shows the simulated NEE anomalies. Irrigation reduces the negative impact of the heat wave and drought on carbon uptake, thus decreasing the 2003 anomalous carbon source (-17%). Introducing crops in ORCHIDEE-STICS changes the structure, phase and amplitude of the seasonal cycle of the NEE anomaly. ORCHIDEE without crops simulates a persistent anomalous source from June to August (\approx +3TgC/day), whereas ORCHIDEE-STICS produces two anomalies, in June (\approx +3TgC/day) and in August (\approx +1.5TgC/day).

Inversions do not give a two-peak seasonal structure in NEE, most likely because they make use either of smoothed monthly atmospheric observation ("LSCE", Peylin [in prep.]) or of smooth temporal constraints to regularize the inverse problem ("JENA", Rödenbeck [in prep.]). However, the anomalous carbon source in 2003 is well detected in both inversions, with smaller amplitude than in the NoCROP simulation but similar amplitude to CROP and CROPi results (discussion in section II.C.4 and Fig. 10). In the following, we will not discuss the exact timing of the inverse anomalies but only the integrated value over several months. The errors associated with the inverse estimates remain indeed rather large on a monthly time scale. On an integrated European and 6-month scale, the difference between inverse estimates of the 2003 NEE anomaly (LSCE-JENA) is three times smaller than the difference between bottom-up estimates (CROPi-NoCROP). On the contrary, the sum of absolute differences on a finer scale between inversions is three times larger than that between simulations (not shown, Smith [2008]).

II.C.3 Spatial pattern of the 2003 NEE anomaly

The spatial pattern of the 2003 climate anomaly, i.e. maximum heat and drought centered on Alpine countries (Fig. 6), is reflected clearly in the growing season cumulated NEE (from May to October, Fig. 9a.-c.). However, the NEE of the "super grass" PFT used instead of crops in ORCHIDEE is much more sensitive to heat and drought (up to $+600gC/m^2$ carbon source anomaly over May-October) than the NEE of the crop PFT used in ORCHIDEE-STICS, particularly in North Eastern Europe. The difference in NEE anomaly spatial distribution between the NoCROP and CROP results (Fig. 9a.-b.) can be due to the shorter potential growing season length (late spring until early autumn) in the North-East compared with the South. The grass PFT, which peaks later in summer in the North, is thus exposed to late-summer stress in 2003 without much compensation possibilities (Fig. 9a.). On the contrary, in ORCHIDEE-STICS, the winter crops, which are in their maximum growth phase in late spring, show a smaller NEE absolute reduction. In North-Western Germany and East Czech Republic, winter crops are even found to be more productive in 2003 than under normal year conditions, causing a larger net carbon uptake (up to $-300 gC/m^2$, Fig. 9b.). Irrigation has the additional effect to enhance carbon uptake of spring C3 crops in Poland. The North half of this country shows a small loss of carbon in 2003 in CROP (+150gC/m², Fig. 9b.), compared with a large gain in CROPi (-300gC/m², Fig. 9c.).

Croatia, Hungary and Serbia, where C4 crops (maize, irrigated or not) predominate [FAO, 2007] are anomalous sources of CO₂ to the atmosphere during 2003 in both CROP and CROPi experiments, as in the NoCROP experiment (Fig. 9a.-c.). This is consistent with the significant maize yield drop simulated in 2003 (Fig. 7c.). Thus, except in the Balkans, the NEE anomalous signal in 2003 is controlled by the response of the C3 crops dominating agricultural land surface.

Although both inversion results indicate an anomalous carbon source in 2003 over Europe, the spatial patterns of NEE changes (not shown, Smith [2008]) are not straightforward to interpret. The center of the European NEE anomaly is placed in Eastern Europe in the LSCE inversion



FIG. 9 – Spatial pattern of the 2003 "summer" (cumulated from May to October) NEE anomaly (gC/m^2) for the ORCHIDEE-based experiments : **a.** NoCROP, **b.** CROP and **c.** CROPi.



FIG. 10 – Cumulated May to October European NEE anomalies (GtC) compared over the 1996-2003 period between ORCHIDEE-based simulations NoCROP (green line), CROP (red line), CROPi (blue line) and the two inversion estimates LSCE (black line) and JENA (grey line).

and in the North Western Europe in the JENA inversion. Given the coarse spatial resolution of both inversions and their reliance on *a priori* settings (e.g. prior flux pattern and associated error structure, see section I.C) their results cannot be safely interpreted on a fine scale (*i.e.* the grid resolution of the transport models, roughly $2^{o} \times 3^{o}$). Large differences appear between both inversions on this scale (up to 300gC/m2 over May to October), which are of larger magnitude than the differences between the ORCHIDEE-based simulations (Fig. 9a.-b.). These regional differences reflect partly the random noise and partly the biases of the inversions. The individual inverse regional patterns have to be discussed together with the posterior flux uncertainties estimated by the inverse procedure. Such an analysis is beyond the scope of this paper. On this scale, refining the process-based bottom-up modelling approach is still a more promising source of knowledge for the carbon cycle before significant improvements can be achieved to increase the resolution of regional estimates.

II.C.4 Discussion

From May to October, terrestrial ecosystems were an anomalous carbon source in Europe in 2003 relative to the rest of the decade (Fig. 10), as demonstrated by the three ORCHIDEE-based simulations as well as by two atmospheric inversions (a synthesis report for both LSCE and JENA inversions is in preparation (Peylin & Rödenbeck, in prep.]. In addition, 2003 is the only year for which all estimates consistently indicate a NEE anomaly of the same sign, over May to October. ORCHIDEE without crops gives an anomalous source of +0.4GtC, nearly twice as large as the $\approx+0.2-0.25GtC$ anomaly simulated by both inversions. The ORCHIDEE-STICS results produce a 2003 anomalous loss of carbon of $\approx+0.25GtC$ and $\approx+0.20GtC$ for non-irrigated and irrigated crops respectively These values are in good agreement with the inversion results.

The main process involved in the 2003 abnormal loss of CO_2 is a decrease in NPP, induced by lowered LAI and a combination of thermal and drought stress affecting plant RUE. This effect is dominant over the small reduction of respiration due to drier soil conditions and lower input to the litter carbon pool. We found that irrigation tends to increase soil respiration, favored by warmer temperatures when water is not limiting for decomposition, but its major effect is the mitigation of the productivity drop, thereby reducing the magnitude of the NEE anomaly.

The fact that the 2003 NEE anomaly is smaller in the CROP and CROPi simulations than in the NoCROP simulation (Fig. 10 and 8b.) can be explained by the presence of winter-type C3 crops in the two ORCHIDEE-STICS model experiments. These winter crops were less exposed to extreme mid- to late-summer stress conditions than the herbaceous PFT (non-irrigated summer-type "super-grass") of the NoCROP experiment. At face value, the winter-type C3 crops were more affected earlier in the season (NPP drop), causing the larger NEE decrease in the CROP simulation than in the NoCROP simulation at the beginning of June (see NEE anomaly in figure 8b.). The large divergence between the NoCROP and the CROP & CROPi experiments at the end of June and in July is most probably due to the harvest of winter crops in the latter. Following harvest, increased respiration allowed by irrigation induces a temporary higher NEE anomaly in the CROPi simulation relative to the CROP simulation. The remaining divergence between simulated anomalies from August onwards (Fig. 8b.) is due to the overall mortality of the C3 "super-grass" in NoCROP. Grass mortality is caused by a NPP drop between August and October (particularly anomalous in the North-East of Europe, Fig. 9a.). This drop is occuring at a time of the year when, in the ORCHIDEE-STICS simulations, only the spring-type C3 crops are responsive to the climate anomaly (Fig. 9b.). Indeed, though their spring-type phenology exposes them (like the "super-grass" in NoCROP) to the drought and related NPP reduction, they share the surface area allocated to C3 crops in each gridcell with the already harvested winter crops. Owing to this lower surface area considered for spring C3 crops (in the PFT-aggregation process to produce the integrated gridcell-scale NEE) and to the fact that winter crops experience no NPP change in the second half of the year, the above-mentioned gap between NoCROP and CROP & CROPi NEE anomaly estimates is created.

Overall, the NoCROP simulation produces an unrealistically large May to October cumulated net carbon uptake reduction in 2003 compared with the simulations accounting for crops (Fig. 10). Such an anomaly (calculated on the 6 months) corresponds to nearly half of the annual fossil fuel emissions across the domain (1.05GtC/year) and represents 28% of the mean May-to October NoCROP NPP. On this scale, the two inversions converge to the much lower source of $\approx 0.2-0.25GtC$. The carbon source estimated by ORCHIDEE-STICS represents 13% (CROPi) to 19% (CROP) of the mean May to October NoCROP NPP. Although we cannot exclude possible aliasing effects between the considered European domain and the surrounding regions, it is very likely that the inversions carry substantial information on this scale to improve the direct modelling of carbon fluxes. Accounting for crops in a vegetation model appears as an essential element that brings the process-based NEE estimates in line with inversion results (Fig. 10).

Concluding remarks

Progress

The main outcome of this work is the overall improvement of simulation realism compared with the previous model version without crops, confirmed by the confrontation of model results against several data or complementary estimates on various temporal and spatial scales. This improvement in reproducing European cropland functioning in ORCHIDEE was mainly achieved by i) the use of the winter-type phenology coming from the STICS generic crop model; and ii) the inclusion of irrigation applied to summer crops. Further than just enhancing the agreement with observed data for the seasonal cycle of LAI available for light interception, the coupled ORCHIDEE-STICS model has shown a good ability to better reproduce agricultural yield mean and variability at national level as well as carbon balance on a European scale. When accounting for crops in the model :

- The simulated growing season length is shorter, its beginning and end are less variable, the maximum growth phase appears earlier in the year and it presents a two-peak structure, the whole being in agreement with remote-sensing observations
- The estimation of crop yields with ORCHIDEE-STICS shows that the inter-annual yield anomalies, and their intensity in extreme years such as 2003, are better correlated with FAO records.
- The 2003 European-wide May to October NEE anomaly is reduced, which brings the bottom-up C loss in good agreement with inversion model estimates, considered as reliable on this scale.

Given that ORCHIDEE was originally unable to represent the specific phenology of cultivated plants and that STICS was initially not designed for geo-spatial applications, we can consider ORCHIDEE-STICS as a satisfactory tool. These results demonstrate potential regional and interannual simulation improvement when associating two complementary models with regard to the performance of each model alone on the intermediate scale considered.

Shortcomings

For future improvement of model response to climate inter-annual and spatial variability, we suggest to correct maize biomass production in ORCHIDEE-STICS by adjusting to Mediterranean ecosystems the parameterization of C4 crop photosynthetic assimilation properties and response to stress. The water balance could be better constrained by assimilating from STICS into ORCHIDEE the seasonal dynamics of the root profile. C3 crop production modelling should include a limitation by upper lethal temperatures.

While trying to be more accurate in modelling agricultural production through a convenient seasonal cycle and photosynthesis parameterization we still take the risk of limiting simulation quality (at a finer level than the country) if we do not also improve in parallel the spatio-temporal representation of agricultural practices, upon which model sensitivity to climate strongly depends. Accounting for spatial variability of soil and agricultural practices such as sowing date, cultivar choice, irrigation and fertilization (needed by STICS) is expected to improve regional simulation realism. Inter-annual variability in crop calendars and practices as well as in land-use maps would permit further analysis of crop and ecosystem productivity scenarios. In the recent global modelling study using LPJmL [Bondeau *et al.*, 2007], spatially and temporally variable sowing dates were computed from climate indices combining temperature and precipitation. They allow for an adaptation of model phenological parameters (heat and vernalization requirements, base temperature for GDD accumulation) to grid cell climate over croplands worldwide.

The aggregation of multiple crop species into an optimal number of generic types to be represented in the model by particular crops and the related treatment of agricultural land-use input maps (and of productivity outputs for comparison to available data) still remain unperfect. For instance in the LPJmL approach, a winter-type to summer-type gradient in the phenology of the "temperate cereal" PFT arose from the above-mentioned adaptability of crop parameters [Bondeau *et al.*, 2007].

The choices made for yield derivation from NPP have shown to be convenient for first order diagnostic analysis, as in Ciais *et al.* [2005], and comparison with FAO data. However, i) refining based on STICS run with spatialized above-mentioned technical input, ii) including in ORCHIDEE-STICS a specific carbon allocation scheme to plant organs such as grains for crops, and iii) considering a better model for respiration of harvested products, would produce more reliable estimates of the outgoing flux for European carbon cycle investigation. In LPJmL an intermediate carbon allocation scheme was developed, based on a daily allocation of the NPP according to the demand from the different plant carbon pools that is prescribed by functions derived from the SWAT model [Bondeau *et al.*, 2007].

Uncertainty reduction on the data side (satellite measurements and agricultural statistics) would be valuable, as well as in the atmospheric inverse approach.

Perspectives

Model development and spatialized input data preparation will allow for a further step in the evaluation of the approach, and will aim at an extended application of ORCHIDEE-STICS to other temperate agricultural regions such as the United States.

The inversion approach provides information on the carbon cycle modelling on large spatial and temporal scales that is complementary to the process-based approach. Integrating such largescale information into ORCHIDEE within a Carbon Cycle Data Assimilation System (CCDAS, Rayner *et al.* [2005]) is a promising way to improve our knowledge of the carbon cycle.

The coupled model outputs can potentially affect further land-surface related energetic processes influencing atmospheric circulation. Their effect could be analyzed within the framework of the IPSL coupled climate model sensitivity experiments.

Feedbacks between climate change and land affectation driven by economic and vegetation productivity changes are already under investigation.

Bibliographie

- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., & Hicke, J. A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations : implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12(3), 191.
- Baker, D. F., Law, R. M., Gurney, K. R., Rayner, P., Peylin, P., Denning, A. S., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y. H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Prather, M., Pak, B., Taguchi, S., & Zhu, Z. 2006. TransCom 3 inversion intercomparison : Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO2 fluxes, 1988-2003. Global Biogeochemical Cycles, 20(1), -.
- Bonan, G. B., Levis, S., Kergoat, L., & Oleson, K. W. 2002. Landscapes as patches of plant functional types : An integrating concept for climate and ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(2), -.
- Bondeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Mueller, C., Reichstein, M., & Smith, B. 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13(3), 679–706.
- Boucher, O., Myhre, G., & Myhre, A. 2004. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics*, 22(6-7), 597.
- Bousquet, P., Peylin, P., Ciais, P., Le Quere, C., Friedlingstein, P., & Tans, P. P. 2000. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 290(5495), 1342–1346.
- Brisson, N. 2004. Special issue : Crop model STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard). Agronomie, 24(6-7), 293-293.
- 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., & Delecolle, R. 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie, 18(5-6), 311–346.
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeau, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M. H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., & Justes, E. 2002. STICS : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. Agronomie, 22(1), 69-92.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J. P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., & Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 309-332.
- Brovkin, V., Sitch, S., von Bloh, W., Claussen, M., Bauer, E., & Cramer, W. 2004. Role of land cover changes for atmospheric CO2 increase and climate change during the last 150 years. *Global Change Biology*, 10(8), 1253.

- Büttner, G., Feranec, J., Jaffrain, G., Mari, L., Maucha, G., & Soukup, T. 2004. The european CORINE Land Cover 2000 project. EARSeL eProceedings, 3(3), 331–346.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J. F., Sanz, M. J., Schulze, E. D., Vesala, T., & Valentini, R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529–533.
- De Noblet-Ducoudré, N., Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B., & Perrier, A. 2004. Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. Agronomie, 24(6-7), 397-407.
- Ducoudré, N. I., Laval, K., & Perrier, A. 1993. Sechiba, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General-Circulation Model. *Journal of Climate*, 6(2), 248–273.
- Enting, I. G., & Mansbridge, J. V. 1989. Seasonal sources and sinks of atmospheric CO₂: direct inversion of filtered data. *Tellus*, **41B**, 111–126.
- FAO. 2007. http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx. ProdStat data.
- Farquhar, G. D., & Wong, S. C. 1984. An Empirical-Model of Stomatal Conductance. Australian Journal of Plant Physiology, 11(3), 191–209.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., & Gibbs, H. K. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science*, **309**(5734), 570–574.
- Friedlingstein, P., Joel, G., Field, C. B., & Fung, I. Y. 1999. Toward an allocation scheme for global terrestrial carbon models. *Global Change Biology*, 5(7), 755-770.
- Gate, P. 1995. Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. ITCF & Lavoisier, Paris.
- Gervois, S., De Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Ciais, P., Brisson, N., Seguin, B., & Perrier, A. 2004. Including Croplands in a Global Biosphere Model : Methodology and Evaluation at Specific Sites. *Earth Interactions*, 8(16), 1–25.
- Gervois, S., , Ciais, P., De Noblet-Ducoudré, N. andBrisson, N., Vuichard, N., & Viovy, N. 2008. Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century. *Global Biogeochemical Cycles*, in press.
- Goudriaan, J., Goot, J. J. R., & Uithol, P. W. J. 2001. Productivity of agro-ecosystems. In : Roy, J., Saugier, B., & Mooney, HA (eds), *Terrestrial global productivity*. Academic Press.
- 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**(1), 29-51.
- Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., Rayner, P. J., Baker, D., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y. H., Ciais, P., Fan, S., Fung, I. Y., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Peylin, P., Prather, M., Pak, B. C., Randerson, J., Sarmiento, J., Taguchi, S., Takahashi, T., & Yuen, C. W. 2002. Towards robust regional estimates of CO2 sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 415(6872), 626-630.

- Holben, B., Kimes, D., & Fraser, R. S. 1986. Directional Reflectance Response In Avhrr Red And Near-Ir Bands For 3 Cover Types And Varying Atmospheric Conditions. *Remote Sensing* Of Environment, 19(3), 213.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin Of The American Meteorological Society, 77(3), 437-470.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., & Prentice, I. C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1), -.
- Kucharik, Christopher J. 2003. Evaluation of a Process-Based Agro-Ecosystem Model (Agro-IBIS) across the U.S. Corn Belt : Simulations of the Interannual Variability in Maize Yield. Earth Interactions, 7(14), 1-33.
- Leff, B., Ramankutty, N., & Foley, J. A. 2004. Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(1), -.
- Lobell, D. B., & Asner, G. P. 2003. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. *Science*, 299(5609), 1032–1032.
- Monteith, J. L. 1977. Climate And Efficiency Of Crop Production In Britain. Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London Series B-Biological Sciences, 281(980), 277.
- Myneni, R. B., Nemani, R. R., & Running, S. W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 35(6), 1380.
- New, M., Hulme, M., & Jones, P. 2000. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II : Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal* Of Climate, 13(13), 2217.
- Osborne, T. M., Lawrence, D. M., Challinor, A. J., Slingo, J. M., & Wheeler, T. R. 2007. Development and assessment of a coupled crop-climate model. *Global Change Biology*, 13(1), 169–183.
- Peylin, P., Rayner, P. J., Bousquet, P., Carouge, C., Hourdin, F., Heinrich, P., Ciais, P., contributors, AEROCARB, &??? 2005. Daily CO2 flux estimates over Europe from continuous atmospheric measurements : 1, inverse methodology. Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 3173-3186.
- Project, PELCOM. 2000. Development of a consistent methodology to derive landcover information on a European scale from remote sensing for environmental modelling. Final Report. Mücher, C.A. (Ed.).
- Ramankutty, N., & Foley, J. A. 1999. Estimating historical changes in global land cover : Croplands from 1700 to 1992. Global Biogeochemical Cycles, 13(4), 997-1027.
- Rayner, P. J., Scholze, M., Knorr, W., Kaminski, T., Giering, R., & Widmann, H. 2005. Two decades of terrestrial carbon fluxes from a carbon cycle data assimilation system (CCDAS). *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2).
- Rödenbeck, C., Houweling, S., Gloor, M., & Heimann, M. 2003. Time-dependent atmospheric CO2 inversions based on interannually varying tracer transport. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 55(2), 488-497.

Saugier, B., Mooney, H. A., & Roy, J. 2001. Terrestrial Global Productivity. Academic Press.

- Sitch, S., Brovkin, V., von Bloh, W., van Vuuren, D., Assessment, Bene, & Ganopolski, A. 2005. Impacts of future land cover changes on atmospheric CO2 and climate. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2).
- Smith, P. C. 2008. Modélisation des cultures au sein de la biosphère : phénologie, productivité et flux de CO₂. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Stephens, B. B., Gurney, K. R., Tans, P. P., Sweeney, C., Peters, W., Bruhwiler, L., Ciais, P., Ramonet, M., Bousquet, P., Nakazawa, T., Aoki, S., Machida, T., Inoue, G., Vinnichenko, N., Lloyd, J., Jordan, A., Heimann, M., Shibistova, O., Langenfelds, R. L., Steele, L. P., Francey, R. J., & Denning, A. S. 2007. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO2. *Science*, **316**(5832), 1732.
- Viovy, N., Francois, C., Bondeau, A., Krinner, G., Polcher, J., Kergoat, L., Dedieu, G., De Noblet, N., Ciais, P., & Friedlingstein, P. 1997. Assimilation of remote sensing measurements into the ORCHIDEE/STOMATE DGVM biosphere model.

Chapitre 2

Cycle saisonnier foliaire des cultures européennes

Sommaire

2.1 Obs	servation	s satellitaires et phénologie dans ORCHIDEE-STICS . 95							
2.1.1	2.1.1 Evaluation préliminaire du LAI avec le jeu de données NOAA-AVHRR								
	mensue	lles du GIMMS [Myneni <i>et al.</i> , 1997]							
2.1.2	Méthod	le d'obtention du jeu de DVI NOAA-AVHRR corrigés journaliers							
	du LSC	$E [Bacour et al., 2006] \dots 95$							
2.1.3	Compa	raison des caractéristiques des LAI GIMMS et DVI LSCE 97							
	2.1.3.1	Diversité des cycles saisonniers							
	2.1.3.2	Distribution spatiale des maxima et minima de LAI et de DVI 103							
	2.1.3.3	Corrélation entre les séries temporelles de LAI et de DVI \ldots 104							
2.1.4	Phénolo	ogie simulée par PFT et pour l'ensemble de la végétation 106							
	2.1.4.1	PFT naturels et agricoles, à phénologie de type "hiver" ou "prin-							
		temps"							
	2.1.4.2	LAI agrégé par maille selon différents scénarios de répartition							
		des cultures d'hiver et de printemps							
2.2 Am	iélioratio	n de la simulation du cycle saisonnier du LAI 109							
2.2.1	Caracté	eristiques du double-pic simulé par ORCHIDEE-STICS et observé 109							
	2.2.1.1	Différences entre scénarios							
	2.2.1.2	Différences entre régions							
2.2.2	Apport	d'ORCHIDEE-STICS par rapport à ORCHIDEE 112							
2.3 Ext	raction of	de la contribution des surfaces cultivées au DVI 117							
2.3.1	Méthod	lologie utilisant deux cartes d'occupation du sol							
2.3.2	Compa	raison des séries de DVI filtrés obtenues \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 120							
2.4 Dét	terminati	ion de la meilleure combinaison de phénologies pour							
l'Eı	urope .	1125							
2.4.1	Distribu	ution spatiale des corrélations avec les observations 125							
2.4.2	Discuss	ion sur le choix du diagnostic \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 129							
	2.4.2.1	Corrélations en mode "toute végétation" ou en mode "cultures							
		seules"							
	2.4.2.2	Diagnostic R^2 ou FMT $\ldots \ldots 131$							
	2.4.2.3	Corrélations aux DVI journaliers ou corrélations aux LAI men-							
2 (2	D .	suels $(GIMMS)$							
2.4.3	Pistes p	our l'amélioration de la répartition et de la phénologie des cultures							
	en Euro	$\begin{array}{c} \text{ope dans le modele} \\ \text{ope dans le modele} \\$							
	2.4.3.1	Caracteristiques du meilleur scenario							
o. (. (2.4.3.2	Inversion de la carte de vegetation							
2.4.4	Conclus	sions et perspectives							
Synthèse	e sur le c	ycle saisonnier foliaire des cultures en Europe 139							

Ce chapitre vient en complément des parties I et II.A de l'article à soumettre à *Global Biogeo*chemical Cycles sur l'évaluation d'ORCHIDEE-STICS à diverses échelles de temps et d'espace.

L'indice foliaire (LAI) a été identifié comme une variable-clé du couplage ORCHIDEE-STICS pour deux raisons principales. i) il permet de forcer la phénologie des PFT herbacés d'ORCHI-DEE par celle des cultures de STICS, validée sur un ensemble de sites [Brisson *et al.*, 2003]. Le développement phénologique est simulé sur la base de plusieurs stades successifs atteints par la plante en fonction de la satisfaction de ses besoins en chaleur et en froid. ORCHIDEE-STICS possède ainsi une représentation de la phénologie des cultures d'hiver, très répandues en Europe. ii) il transmet implicitement des informations, comme la date de semis et de récolte, qui contraignent la durée de la saison de croissance pour chaque PFT agricole, et le niveau de satisfaction des besoin en eau et en azote, qui influent sur la surface foliaire disponible pour la production de biomasse.

Du cycle saisonnier foliaire dépendent dans ORCHIDEE, de même que dans la réalité, les flux de CO_2 , d'eau et d'énergie échangés entre la surface et l'atmosphère. L'estimation de ces échanges peut être améliorée via une meilleure simulation de la saisonnalité de leur support. Les propriétés de la saison de croissance (durée, positionnement dans l'année *etc.*) sont détectables par satellite via les mesures régulières de réflectance de la surface. L'objet de ce chapitre est l'évaluation, à l'échelle européenne et sur une période de 20 ans, du cycle saisonnier foliaire de la végétation agricole simulé par ORCHIDEE-STICS. Il s'agit en particulier de quantifier :

- les modifications apportées à la phénologie par la prise en compte des plantes cultivées dans ORCHIDEE (CROP vs. NoCROP), et
- l'ajustement de la nouvelle phénologie à plusieurs séries d'observations satellites (CROP vs. observations).
- La partie 2.1 présente la méthodologie d'évaluation utilisant des données de télédétection. Elle fait la transition (sous-partie 2.1.1) entre l'article Smith *et al.* [soumis] et la suite de l'étude où un deuxième jeu de données est utilisé. J'explique en sous-partie 2.1.2 comment ce deuxième jeu de données a été obtenu puis je le compare au premier (sous-partie 2.1.3). Le traitement des résultats de simulation (LAI CROP & NoCROP) est présenté en vue de leur analyse comparative, tous types de végétation confondus, avec les données satellitaires. En particulier, quatre tests de sensibilité à la répartition des types phénologiques de cultures "hiver" et "printemps" sont définis (2.1.4.2).
- La partie 2.2 discute les résultats des comparaisons de cycles saisonniers simulés et observés. L'amélioration de la phénologie simulée est visualisée puis quantifiée selon les différents scénarios ,appliqués à des mailles contrastées (en termes climatiques) mais toutes à dominante agricole.
- En partie 2.3 on propose une extraction d'un signal représentatif de la végétation agricole dans les données satellitaires, pour permettre une comparaison plus ciblée avec les simulations d'ORCHIDEE-STICS pour les PFT agricoles.
- La partie 2.4 applique, à l'échelle européenne, plusieurs diagnostics pour évaluer l'accord spatiotemporel des séries simulées et observées. Elle débouche sur des pistes d'améliorations de la carte de végétation et de la représentation spatialisée des cultures dans ORCHIDEE-STICS.

2.1 Observations satellitaires et phénologie dans ORCHIDEE-STICS

2.1.1 Evaluation préliminaire du LAI avec le jeu de données NOAA-AVHRR mensuelles du GIMMS [Myneni *et al.*, 1997]

Sur la base de comparaisons mensuelles des LAI simulés et observés sur la période 1982-2002, j'ai montré que le cycle saisonnier est plus réaliste dans la simulation CROP que dans la simulation NoCROP. Le début et la fin de la saison de croissance sont mieux phasés (article Smith *et al.* [soumis], partie II.A). Le maximum de LAI apparait plus tôt dans la saison et est mieux phasé lui aussi. La mesure utilisée pour quantifier cette amélioration est la Figure of Merit in time (FMT), qui montre un accord deux fois meilleur en moyenne sur l'Europe après introduction de la représentation des cultures via STICS.

Ces résultats ont été obtenus à partir du jeu de LAI mensuels, à 0.25° de résolution, fournis par le GIMMS¹ [Myneni *et al.*, 1997] et regrillés comme dans Zhou *et al.* [2001]. Ces LAI proviennent eux-mêmes d'indices normalisés de végétation NDVI² corrigés des effets atmosphériques et convertis au moyen de relations établies pour chacun des 7 grands biomes de la classification MODIS³ [Knyazikhin *et al.*, 1998]. Ces relations sont non linéaires et variables selon les types de végétation. Le LAI ainsi dérivé est très sensible à de faibles variations dans les fortes valeurs de NDVI [Myneni *et al.*, 1997]. Les indices NDVI utilisés sont des composites ne retenant que la valeur maximale sur une période donnée (MVC⁴, Holben *et al.* [1986]).

Afin de i) pouvoir évaluer le cycle saisonnier simulé plus finement qu'avec 12 valeurs par mois dérivées des observations satellitaires et ii) d'avoir une mesure qualitative de l'incertitude associée à ce type de données, j'ai utilisé un deuxième jeu de données.

2.1.2 Méthode d'obtention du jeu de DVI NOAA-AVHRR corrigés journaliers du LSCE [Bacour *et al.*, 2006]

Le deuxième jeu de données utilisé consiste en une série journalière d'indices de végétation DVI^5 à 8km de résolution, sur la période 1982-1999, produits par Bacour *et al.* [2006]. Une correction préliminaire des effets directionnels dans les séries temporelles de réflectances a été effectuée en utilisant des signatures propres à chaque biome dans les longueurs d'onde du rouge et du proche infra-rouge (*pIR*) [Bacour & Breon, 2005]. La figure 2.1a. illustre le fait que la géométrie des mesures de réflectance peut être très variable, selon l'angle solaire (θ_s), l'angle de vue du satellite (θ_v) et l'angle azimuthal relatif formé par les deux plans dans la direction du nadir⁶ contenant respectivement le soleil et le satellite.

L'instrument POLDER⁷ mesure des réflectances qui peuvent être utilisées pour caractériser la variabilité des signatures directionnelles de la surface continentale en fonction du type de végétation [Bacour & Breon, 2005]. Pour une configuration angulaire donnée et la longueur d'onde 865nm (*pIR*), la figure 2.1b. représente l'hémisphère visible par l'instrument et les valeurs de réflectances associées aux différents angles de vue. Le plan solaire est celui passant par le centre de la Terre qui contient le satellite et le soleil. C'est dans ce plan que se trouve le "hot spot" visible en rouge sur la figure. Il apparait sur une surface lorsque le soleil et le satellite sont alignés

¹Global Inventory Monitoring and Modelling Studies

²Normalized Difference Vegetation Index

³MODerate resolution Imaging Spectrometer

⁴Maximum Value Composite

⁵Difference Vegetation Index

⁶ou zénith : direction verticale

⁷POlarization and Directionality of the Earth's Reflectances



FIG. 2.1 – **a.** Configuration des mesures de réflectances par satellite. **b.** Réflectances directionnelles (%) mesurées par POLDER sur l'hémisphère visible pour $\lambda = 865$ nm, les valeurs maximales s'observent en rétro-diffusion. **c.** Exemples de signatures de réflectances directionnelles (sans unité) dans le plan principal pour un biome d'herbacées/cultures et un biome de forêt décidue en fonction de l'angle de vue du satellite (°) et de la longueur d'onde ($\lambda = 865$ nm triangles rouges et 670nm losanges verts), le soleil est sur ces exemples entre 40° et 42°, les mesures (symboles) ont été fittées par un modèle à 3 paramètres (lignes). **d.** Réflectances (sans unité) mesurées pour un sol nu et un couvert végétal en fonction de λ et déduction des indices de végétation par différence entre les canaux proche infra-rouge et visible (rouge).

avec la Terre et il est responsable des valeurs de réflectance maximales.

La figure 2.1c. montre les signatures de réflectances directionnelles obtenues dans le plan solaire pour deux biomes (parmi les 7 définis par MODIS [Knyazikhin *et al.*, 1998]), en fonction de l'angle de vue du satellite et de la longueur d'onde. Les mesures ont été fittées par un modèle à trois paramètres [Maignan *et al.*, 2004]. L'aspect le plus frappant qui différencie les deux biomes n'est pas la réponse des réflectances dans l'espace géométrique⁸ (les courbes ont la même forme de pic autour de 40-42° qui est la direction du soleil) mais celle dans l'espace spectral⁹ [Bacour & Breon, 2005] : la signature du biome d'herbacées/cultures (réflectance comprise entre 0.15 et 0.35) est très différente de celle du biome de forêt décidue (0.03-0.08) dans la longueur d'onde 670nm (visible, rouge) tandis que les deux sont similaires dans la longueur d'onde 865nm (*pIR*).

Une fois les réflectances normalisées en utilisant le paramètre principal (spectral), le DVI se calcule par différence entre les réflectances des canaux pIR (très forte réflexion du rayonnement) et visible (plus ou moins forte absorption du rayonnement) :

$$DVI = R_{pIR} - R_{visR} \tag{2.1}$$

où R est la réflectance et visR le canal correspondant à la longueur d'onde du rouge dans le visible. Le DVI normalisé, ou NDVI, se calcule ainsi :

$$NDVI = \frac{R_{pIR} - R_{visR}}{R_{pIR} + R_{visR}} = \frac{DVI}{R_{pIR} + R_{visR}}$$
(2.2)

Les indices correspondant au sol nu, quasiment nuls, sont inférieurs à ceux d'un couvert végétal. Pour l'exemple de la figure 2.1d. :

$$DVI_{nu} \approx 0.15 - 0.10 = 0.05$$
 (2.3)

$$NDVI_{nu} \approx \frac{DVI_{nu}}{0.15 + 0.10} \approx \frac{0.05}{0.25} = 0.20$$
 (2.4)

$$DVI_{veg} \approx 0.45 - 0.05 = 0.40$$
 (2.5)

$$NDVI_{veg} \approx \frac{DVI_{veg}}{0.45 + 0.05} \approx \frac{0.40}{0.50} = 0.80$$
 (2.6)

L'utilisation du DVI plutôt que du NDVI permet de réduire le bruit résultant des perturbations atmosphériques. En effet le DVI est supposé moins bruité que le NDVI car dans la formule de ce dernier, l'incertitude intervient deux fois à cause de l'opération de division [Bacour *et al.*, 2006].

2.1.3 Comparaison des caractéristiques des LAI GIMMS et DVI LSCE

Les valeurs des LAI (0 pour un sol nu et par exemple 4 pour un couvert végétal) ne sont théoriquement pas comparables à celles des DVI. Tous deux auraient pu être convertis en f_aPAR , mais la relation $f_aPAR = f(DVI)$ est complexe ; c'est la relation $f_aPAR = f(NDVI)$ qui est classiquement considérée comme linéaire [Myneni *et al.*, 1997], tandis que la relation $f_aPAR =$ f(LAI) peut être représentée par une exponentielle (vu au chapitre 1, en section 1.2.1.2). En première approximation, l'expression $DVI \times 10$ sera comparée au LAI malgré la non-linéarité de la relation entre les deux, en vue d'une description qualitative du cycle saisonnier (phase, occurence de maxima multiples en lien avec le type de phénologie, distribution spatiale). J'ai

⁸en fonction de l'angle solaire

⁹en fonction de la longueur d'onde



FIG. 2.2 – Position des 11 mailles choisies pour la comparaison entre LAI et DVI, a.-j. étant fortement et k. faiblement cultivées.

choisi pour cette étude dix mailles du modèle ORCHIDEE-STICS $(0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ})$ représentatives de régions fortement agricoles et une maille représentative d'une région faiblement agricole (d'après la carte de végétation d'ORCHIDEE-STICS présentée au chapitre 1, en section 1.3.3 et figure 1.7a.). Les coordonnées des ces 11 mailles sont positionnées sur la carte de la figure 2.2. Leur couverture végétale d'après MODIS est présentée dans le tableau 2.1. Rappelons que les 7 biomes MODIS ont été utilisés à la fois pour générer les LAI à partir des NDVI et pour corriger des effets directionnels les réflectances entrant dans le calcul des DVI. Les données de LAI (0.25°) et de DVI (8km) ainsi que les données MODIS de distribution des biomes (8km) ont été agrégées à la résolution du modèle (0.5°) .

Tab.	2.1 –	Composition	ı en	biomes	de	chaque	maille	de	0.5^{o}	X	0.5^{o} ,	en	%	de	la s	surface	totale
$de \ la$	maille	e, d'après la	cart	e MOD	IS.	$On \ ne$	donne	ici	que l	es	valeu	rs s	$sup \epsilon$	érie	ure.	s a 10	%. Les
valeu	rs en g	gras indiquen	$t \ le$	biome a	lom	inant d	ans che	ique	e mai	lle							

		$G\&CC^1$	$\mathbf{B}\mathbf{C}^2$	\mathbf{Sh}^3	\mathbf{Sa}^4	\mathbf{D}^5	\mathbf{BF}^{6}	\mathbf{NF}^7
a.	Grande-Bretagne	50	48					
b.	France-Beauce	75	21					
c.	France-Aquitaine	28	66					
d.	Espagne-Nord	16	10	65				
e.	${f Espagne-Sud}$	22		46		17		
f.	${f Allemagne-Nord-Ouest}$	56	16				14	
g.	${f Allemagne-Est}$	82						
h.	Pologne	87						
i.	Italie-Pô	66	32					
j.	Balkans	88						
k.	${f France-Massif-Central}$	23			29		38	

¹Grasses & Cereal Crops

²Broadleaf Crops

- $^{3}\mathrm{Shrubs}$
- $^{4}\mathrm{Savannas}$

 5 Desert

⁶Broadleaf Forest

⁷Needleleaf Forest



FIG. 2.3 – $DVI \times 10$ journaliers (LSCE, noir) et LAI mensuels (GIMMS, bleu cyan) comparés sur la période 1982-1999 (à gauche) et en moyenne (à droite), sur les mailles de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ hautement cultivées **a.** Grande-Bretagne, **b.** France-Beauce, **c.** France-Aquitaine, **d.** Espagne-Nord et **e.** Espagne-Sud.



f. Allemagne-Nord-Ouest $7.75^{\circ}E$ $52.25^{\circ}N$

FIG. 2.4 – $DVI \times 10$ journaliers (LSCE, noir) et LAI mensuels (GIMMS, bleu cyan) comparés sur la période 1982-1999 (à gauche) et en moyenne (à droite), sur les mailles de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ hautement cultivées **f.** Allemagne-Nord-Ouest, **g.** Allemagne-Est, **h.** Pologne, **i.** Italie-Pô et **j.** Balkans.



FIG. 2.5 – $DVI \times 10$ journaliers (LSCE, noir) et LAI mensuels (GIMMS, bleu cyan) comparés sur la période 1982-1999 (à gauche) et en moyenne (à droite), sur la maille de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ peu cultivée k. France-Massif-Central.



FIG. 2.6 – Date (jour de l'année) à laquelle le DVI est maximal en 1996. Le jour 80 marque la fin-Mars et le jour 270 la fin-Septembre. La couleur bleu foncé indique la fin-Avril, vert clair le début-Juillet et orange, le début-Août.

2.1.3.1 Diversité des cycles saisonniers

On remarque en premier lieu une anti-phase hivernale (de Novembre à Février) entre les deux séries de données, tous les ans et en moyenne sur les 18 ans. En Grande-Bretagne (Fig. 2.3a.), en Beauce (Fig. 2.3b.) et en Pologne (Fig. 2.4h.) les valeurs hivernales du LAI ne sont pas nulles et présentent même un pic (secondaire par rapport au pic principal estival), tandis qu'un tel pic hivernal n'est pas observé dans le DVI qui atteint son minimum à cette période. Ce pic de LAI irréaliste n'est pas justifié par la phénologie d'une espèce particulière mais est certainement dû à une correction non optimale du signal. Il se peut que le défaut initial du signal tienne à la géométrie de la mesure en hiver, caractérisée par des angles solaires θ_s forts (soleil bas sur l'horizon). Il arrive que le DVI, après avoir atteint des valeurs inférieures à 0.05 ($DVI \times 10 < 0.5$), voires négatives, présente un petit pic en fin d'hiver, juste avant le début de la saison de croissance (ex. Pologne en 1983, 1984, 1986, 1992, 1993 Fig. 2.4h.). Les valeurs de DVI proches de 0 sont dûe à la présence de neige et le petit pic à sa fonte, qui laisse un sol humide [Baumgardner *et al.*, 1985]. Celui-ci s'assèche puis l'augmentation de l'indice de végétation reprend jusqu'au pic estival.

Les maxima du LAI et du DVI sont dans l'ensemble bien phasés sur les mailles retenues. Ce maximum apparaît au mois de Juin dans les régions du Nord (Beauce Fig. 2.3b., Grande-Bretagne Fig. 2.3a., Allemagne Fig. 2.4f.-g. et Pologne Fig. 2.4h.). D'après le DVI journalier, le démarrage de la saison de croissance est précoce et progressif à l'Ouest (Beauce, Grande-Bretagne), avec une végétation déjà active au mois de Mars, tandis qu'il est plus tardif et abrupt, à l'Est (Allemagne et Pologne). Ceci peut s'expliquer par la continentalité du climat, qui retarde l'accumulation d'unités de chaleur en début de cycle mais l'accélère ensuite. Le gradient Sud-Ouest Nord-Est est bien visible sur la figure 2.6. Les dates de maximum s'échelonnent de mi-Mars (violet) à début Juillet (vert clair). La végétation du Pays de Loire est celle qui, en France, atteint son maximum de couverture foliaire le plus en avance. La résolution temporelle plus fine du DVI (journalier) par rapport au LAI (mensuel) permet d'observer une légère rupture de pente en fin d'été pendant la phase de décroissance de l'indice sur les cinq mailles représentatives de ces régions du Nord de l'Europe (Fig. 2.3**a.-b.** et 2.4**f.-h.**). Un deuxième pic apparaît au mois de Septembre, d'amplitude plus importante dans l'Est que dans l'Ouest, ce qui suggère la présence de cultures à phénologie de type "printemps"¹⁰, non détectée dans le LAI mensuel. Le signal reste toutefois dominé dans les deux jeux de données par des cultures à phénologie de type "hiver"¹¹, responsables du pic de Juin.

Un cycle de DVI à double-pic, bien qu'atténué en amplitude et plus en avance dans la saison, s'observe sur la maille du Nord de l'Espagne (Fig. 2.3d.), avec un premier pic dominant en Mai et un second en Août. En Aquitaine (Fig. 2.3c.), le double-pic Avril-Mai/Juillet-Août est équilibré. Dans la Plaine du Pô et les Balkans (respectivement Fig. 2.4i. et j., c'est le deuxième pic qui est dominant. Ces trois dernières zones sont dans la réalité effectivement cultivées principalement en maïs [US Department of Agriculture World Agricultural Outlook Board Joint Agricultural Weather Facility, 2007], qui fait partie des cultures à phénologie de type "printemps". Elles sont certainement responsables de la couleur orange et rouge locale sur la figure 2.6 en 1996¹².

Malgré le bon phasage général du pic (ou double-pic) estival entre les deux jeux de données, la corrélation est (à cause de l'anti-phase causée par le pic hivernal inapproprié de LAI), moins bonne sur trois mailles au Nord de l'Europe ($0.53 < R^2 < 0.66$ en Grande-Bretagne, Beauce et Pologne), que sur les autres mailles agricoles ($0.76 < R^2 < 0.95$) et la maille peu cultivée du Massif-Central ($R^2 = 0.80$), où la grande différence d'amplitude entre LAI et DVI n'a pas d'effet sur le calcul du coefficient. Ces chiffres correspondent à la corrélation calculée sur la série entière mensuelle, en prenant pour le jeu de DVI journalier la moyenne des valeurs du mois. Sur le Sud de l'Espagne, la quasi-absence de saisonnalité dans le signal de LAI mensuel réduit la valeur de

¹⁰ en référence à la période à laquelle ces cultures sont semées

 $^{^{11}\,}idem$

 $^{^{12}}$ La maille sélectionnée surnommée Aquitaine est en 1996, juste en dehors de cette zone où le DVI est maximum en Août, mais en 1997 elle y contribue. Il en est de même pour la maille sélectionnée dans les Balkans



FIG. 2.7 – Valeurs maximales **a.** et **b.** et minimales **c.** et **d.**, sur la série 1982-1999 des LAI mensuels (GIMMS) à $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (à gauche) et DVI×10 journaliers (LSCE) à $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (à droite).

la corrélation à 0.57.

2.1.3.2 Distribution spatiale des maxima et minima de LAI et de DVI

Sur les deux mailles espagnoles (Fig. 2.3d.-e.), le cycle saisonnier du LAI a une amplitude très faible, sa valeur maximale est de 1 au Nord et 0.5 au Sud. La faible amplitude du LAI peut être dûe aux propriétés de la relation permettant la conversion du NDVI en LAI pour le biome de végétation arbustive (Sh), qui est affiché dominant sur ces deux mailles (Tab. 2.1). Le cycle saisonnier du DVI, quoique d'amplitude moyenne plus faible que sur les autres mailles choisies, est bien marqué. Un double-pic en Avril-Mai et Juillet-Août est même très visible sur la maille du Sud de l'Espagne. La cause de la faible amplitude du cycle dans les deux jeux de données peut être la sécheresse du sol dans ce pays méditerranéen, qui augmente la réflectance dans le rouge (visR) plus que dans le proche infra-rouge (pIR). Cet effet réduit la différence de réflectance entre les deux canaux et par conséquent diminue les indices DVI et NDVI [Riou & Seyler, 1995].

On retrouve ces valeurs très faibles de LAI dans l'Est de la Péninsule Ibérique sur la carte européenne qui montre le maximum du LAI sur toute la série temporelle (Fig. 2.7a.. Le maximum de LAI dépasse difficilement 1. C'est sur cette même zone que le maximum de DVI est le plus faible (Fig. 2.7b.).

La végétation d'Irlande et de l'Ouest de l'Angleterre est celle qui donne les DVI maxima les plus élevés ($DVI \times 10$ compris entre 3 et 4). De la même façon, on observe des maxima de LAI élevés dans ces Iles Britanniques (entre 3 et 6, Fig. 2.7a.). Cependant, le LAI maximum est aussi élevé sur toutes les régions montagneuses, celles côtières ou sableuses couvertes de conifères et les landes comme en Bretagne et dans le Cotentin. Cette distribution spatiale n'apparaît pas du



 R^2 LAI vs. DVI

FIG. 2.8 - Coefficient de corrélation entre les séries LAI et DVI calculé sur la période 1982-1999
a., sur les cycles moyens b. et sur les anomalies mensuelles (cycles saisonniers moyens soustraits de chaque année)
c. Différence entre la corrélation calculée sur les cycles moyens et celle calculée sur la période 1982-1999
d.

tout dans le DVI (Fig. 2.7**b.**). On note que le maximum de LAI sur la maille peu cultivée du Massif Central (Fig. 2.5) est deux fois plus élevé que sur les 10 autres mailles choisies. Ce fort LAI peut être lié à la relation entre le NDVI et le LAI pour le biome de forêt décidue (BF), affiché dominant sur cette maille (Tab. 2.1). En raison de la saturation déjà évoquée [Gower *et al.*, 1999] de l'efficience d'interception du rayonnement ($f_a PAR \approx 80\%$) pour un LAI supérieurs à ≈ 3 l'erreur est plus grande sur les forts LAI obtenus à partir de forts NDVI. Il en est de même pour les DVI supérieurs à ≈ 0.3 ($DVI \times 10 > 3$).

Les deux cartes de minimum montrent une distribution spatiale plus semblable entre LAI et DVI (Fig. 2.7c. et d.). Le LAI et DVI minima sont tous deux relativement élevés dans les zones où la végétation dominante est toujours active en hiver, par exemple celle de type sempervirente ou herbacée (quand elle n'est pas cultivée ou recouverte de neige). Ces valeurs minimales élevées s'observent sur les cycles saisonniers des mailles du Massif Central (Fig. 2.5) et de l'Allemagne du Nord-Ouest (Fig. 2.4f.). Or ce sont les deux seules mailles parmi les 11 choisies qui sont couvertes à plus de 10% par le biome de forêt décidue (BF, Tab. 2.1), dont le sous-bois est certainement constitué d'herbacées pérennes.

2.1.3.3 Corrélation entre les séries temporelles de LAI et de DVI

La figure 2.8a. montre la corrélation mensuelle (calculée sur la période entière) entre les deux jeux de données. Les LAI et DVI sont très bien corrélés sur les Balkans ($R^2 > 0.9$). Ils le sont

beaucoup moins sur les zones identifiées comme problématiques dans le LAI (cycle saisonnier peu marqué en Espagne et anti-phase hivernale dans les zones proche de la Manche, mer du Nord et mer Baltique). Le calcul de la corrélation entre cycles moyens au lieu des séries entières de DVI et LAI (Fig. 2.8b.) annule l'effet de la variabilité inter-annuelle mais pas un biais systématique dans le cycle saisonnier. Par exemple en Espagne et Grande-Bretagne, la corrélation calculée entre cycles moyens reste faible à cause du problème de structure du cycle non adéquate, a priori, dans le jeu de LAI observés. On voit sur la carte de la différence entre les deux corrélations (Fig. 2.8d.) que celle-ci est faible en Espagne, ainsi que dans les Balkans. Dans les Balkans la cause n'en est pas un biais mais le fait que la corrélation soit déjà très bonne sur la série entière (Fig. 2.8a.). La carte 2.8c. montre qu'en Espagne les anomalies inter-annuelles des LAI et DVI sont mieux corrélées qu'ailleurs ($R^2 \approx 0.5$) malgré le biais entre leurs cycles saisonniers moyens (Fig. 2.8b.). La corrélation entre anomalies est en revanche quasi-nulle (mais sur la plupart des mailles en bleu non significative) au Nord du Portugal et dans les Alpes (Fig. 2.8c.) alors que les cycles moyens sont très bien corrélés (Fig. 2.8b.).

Etant donné le nombre de degrés de liberté dans le calcul d'une corrélation mensuelle sur un cycle saisonnier moyen (Fig. 2.8**b**.), (à savoir dix car on a douze valeurs), il est important de s'intéresser à la significativité de cette corrélation. Les tables du "Student-test" précisent qu'une valeur de R doit être supérieure à 0.58 ($R^2 > 0.33$) pour être significative au seuil de 5%, et supérieure à 0.71 ($R^2 > 0.50$) au seuil 1%. Quelques valeurs en Espagne et en Angleterre se trouvent ainsi exclues de l'intervalle de confiance. Concernant le calcul sur la période inter-annuelle, les seuils de significativité obtenus (avec 12×18 valeurs) pour R^2 sont abaissés à 0.02 au seuil 5% et 0.03 au seuil 1%. Toutes les corrélations de la carte 2.8**a**. sont donc significatives.

L'incertitude autour des données satellitaires est forte, à cause des effets atmosphériques, de l'effet de l'humidité du sol, de la confusion possible entre la fonte des neige et le démarrage de la végétation, de la géométrie d'observation et de l'anisotropie¹³ des surfaces. Si les données ne peuvent être optimalement corrigées, l'approche SNR (Signal to Noise Ratio) permet de mesurer la performance de l'indice de végétation utilisé vis à vis du bruit lié à une ou plusieurs causes [Leprieur *et al.*, 1994]. Les transformations du signal pour en faire une grandeur plus comparable à une certaine variable étudiée (par exemple LAI) peuvent elles-mêmes introduire de l'incertitude via les hypothèses nécessaires au traitement. Les NDVI et LAI dérivés des observations AVHRR par le GIMMS ont été utilisés entre autres par [Piao *et al.*, 2006] pour mettre en relation les tendances observée et simulée dans l'hémisphère Nord à l'allongement de la saison de croissance au cours des deux dernières décennies. L'utilisation d'un DVI journalier a été validée dans le cadre de l'évaluation de la phénologie dérivée d'observations AVHRR vis-à-vis de données au sol [Maignan *et al.*, 2008]. J'utilise pour l'évaluation de la phénologie simulée par ORCHIDEE-STICS dans cette thèse principalement les DVI, en rappelant ponctuellement certains résultats obtenus avec les LAI GIMMS.

¹³La propriété des surfaces est dépendante de la direction dans laquelle elles sont observées

2.1.4 Phénologie simulée par PFT et pour l'ensemble de la végétation

Le cycle saisonnier du LAI est simulé par ORCHIDEE-STICS pour chaque PFT séparement. Or les données dérivées d'observations satellitaires qui ont été présentées dans les sections précédentes fournissent un signal représentant l'ensemble de la végétation et du sol dans chaque maille de la grille. Pour rendre la comparaison possible entre résultats de simulations et données j'ai agrégé les LAI des PFT selon plusieurs variantes de la carte de végétation.

2.1.4.1 PFT naturels et agricoles, à phénologie de type "hiver" ou "printemps"

On a vu au chapitre 1 (section 1.2.1.1) les caratéristiques principales des LAI individuels des PFT 3 agricoles d'ORCHIDEE-STICS (Fig. 1.4d.) et des 2 PFT pseudo-agricoles de la version d'origine d'ORCHIDEE (Fig. 1.4c.). Les LAI des PFT naturels herbacés et ligneux qui occupent la fraction non cultivée de chaque maille du modèle ont été brièvement décrits aussi (Fig. 1.4a.-b.). L'agrégation des LAI agricoles et naturels donne un signal d'autant plus sensible à l'utilisation de STICS (CROP) ou non (NoCROP) que la fraction de surface cultivée totale par maille est importante dans la carte de végétation. A fraction cultivée totale égale, la carte de végétation fait peser les cultures d'hiver et les cultures de printemps différemment selon les pays (chapitre 1, section 1.3.3.3, Fig. 1.6 [Leff *et al.*, 2004]) dans le LAI agrégé.

2.1.4.2 LAI agrégé par maille selon différents scénarios de répartition des cultures d'hiver et de printemps

La carte de végétation utilisée dans les simulations CROP, CROPi et NoCROP affecte aux surfaces des mailles de la grille la fraction agricole totale présentée en figure 2.9a. (40% en moyenne sur l'Europe, CORINE+PELCOM). Elle correspond à la somme des contributions des trois PFT agricoles. La contribution du PFT agricole en C4, représenté par la phénologie du maïs, est faible sur l'Europe (3% en moyenne, Fig. 2.9b.). Les principales régions contributrices sont les Balkans, la France et l'Italie. Les contributions des PFTs agricoles en C3 d'hiver et de printemps respectivement représentés par la phénologie du blé et du soja sont plus importantes (13 et 23 % en moyenne, Fig. 2.9d.-e.. C'est en France et en Grande-Bretagne que l'on trouve les plus grandes fractions de C3 d'hiver. Une large dominance des C3 de printemps s'observe en Pologne, dans la Plaine du Pô et en Espagne.

En me basant sur les hypothèses (confirmées par des comparaisons préliminaires de cycles foliaires simulés par ORCHIDEE-STICS aux cycles observés par satellite)

- que la proportion de cultures en C3 de printemps est sur-estimée dans la carte de végétation (CORINE+PELCOM combinée à Leff *et al.* [2004])
- et que le soja n'est pas la culture en C3 à phénologie de type "printemps" la plus représentative en Europe,

j'ai recombiné les LAI des 3 PFT agricoles de la simulation CROP selon quatre variantes, la quatrième faisant intervenir un PFT naturel herbacé. Une dernière hypothèse nous a permis de faire ce travail a posteriori sans relancer de simulation : celle que les PFT agricoles d'une maille n'interagissent que peu entre eux. Le seul impact qu'un changement de surface occupée par un PFT pourrait entraîner sur le LAI du PFT voisin passerait par un changement de la disponibilité en eau dans le compartiment commun à tous les PFT et une modification du bilan énergétique à l'échelle de la maille. Or ces deux effets sont considéres comme négligeables, d'autant que l'on effectue les recombinaisons en faveur des cultures en C3 d'hiver ou des herbacées naturelles en C3, qui ont tendance à prélever l'eau les unes à une période moins critique que le plein été et les autres de façon plus étalée sur la saison. Ces tests de sensibilité (qu'on appellera par la suite "scénarios" par abus de langage) ne concernent pas la simulation NoCROP réalisée avec ORCHIDEE-Standard, qui reste la version initiale de référence.
a. Tous PFT agricoles



b. PFT agricole C4 (maïs)



PFT nat. herb. C3 PFT agri. C3 "hiver" c. d.

PFT agri. C3 "printemps" e.



FIG. 2.9 – **a.** Fraction de maille occupée par l'ensemble des 3 PFT agricoles. **b.** Fraction de maille occupée par le PFT agricole C4 (maïs), identique dans les 4 scénarios. Fractions de maille occupées par le PFT naturel herbacé C3 (à gauche), le PFT agricole en C3 d'hiver (au milieu) et le PFT agricole en C3 de printemps (à droite) selon les scénarios SOY **c.-e.**, NO **f.-h.**, FEW **i.-k.** et NAT **l.-n.**.

- "SOY" : toutes les cultures en C3 de printemps sont représentées par le soja (carte de végétation initiale, Fig. 2.9d.-e.)
- "NO" : toutes les cultures en C3 de printemps sont remplacées par les cultures en C3 d'hiver (Fig. 2.9g.-h.), ne restent que les cultures en C4 comme phénologie agricole de type "printemps" (Fig. 2.9b.)
- "FEW" : la moitié des cultures en C3 de printemps est remplacée par les cultures en C3 d'hiver (Fig. 2.9j.-k.)
- "NAT": toutes les cultures en C3 de printemps sont remplacées par les herbacées naturelles en C3 (Fig. 2.91.-n.). Ces herbacées naturelles¹⁴ occupent dans les trois scénarios précédents les fractions prescrites dans la carte de végétation initiale, et présentées en figures 2.9c., f. & i.)

Le scénario FEW est celui qui a été utilisé pour l'étude présentée dans l'article Smith *et al.* [soumis] en partie II.A. L'influence des différents scénarios sur le cycle saisonniers foliaire de la végétation agrégée par maille et les enseignements à tirer de la comparaison aux données satellitaires pour l'amélioration de répartition des cultures d'hiver et de printemps dans la carte de végétation d'ORCHIDEE-STICS font l'objet des deux parties suivantes.

¹⁴ Attention, il s'agit bien des herbacées naturelles, présentes à la fois dans les simulations CROP et NoCROP, et non pas des herbacées pseudo-agricoles de NoCROP, qui sont, elles, remplacées par les PFT agricoles dans CROP

2.2 Amélioration de la simulation du cycle saisonnier du LAI

Dans cette partie, j'analyse sur 4 mailles, sélectionnées pour la fraction importante de surface agricole totale qu'elles contiennent (>80% d'après la carte de végétation du modèle, *i.e.* CORINE+PELCOM), les correspondances et écarts entre le LAI simulé (toute végétation agrégée) et le DVI journaliers. La simulation NoCROP sert de référence, par rapport à laquelle l'amélioration apportée par chacun des scénarios (SOY, NO, FEW & NAT) déclinant la simulation CROP est évaluée. La simulation CROP in rest pas analysée ici pour la même raison que dans la partie II.A de l'article Smith et al. [soumis], à savoir le faible effet de l'irrigation sur le LAI agrégé par maille. La principale culture irriguée, le maïs, ne couvre qu'une faible fraction de la surface de la plupart des mailles. Les 4 mailles font partie des 11 précédemment choisies (Fig. 2.2) pour la comparaison des cycles saisonniers des indices de végétation des deux jeux de données satellitaires (Fig. ??, ?? & 2.5). satellitaires. Ces mailles contrastées (b., g., c. & e.) représentent le gradient de phénologies entre le Nord, le Sud, l'Ouest et l'Est de la fenêtre européenne étudiée. Pour plus de lisibilité, les résultats journaliers sont montrés sur seulement 3 années consécutives (1996, 1997 & 1998, inclues dans la période pour laquelle la confrontation du LAI GIMMS et du LAI de la simulation CROP a été visualisée dans l'article Smith et al. [soumis]). Les corrélations modèle vs. données sont cependant calculées sur la période complète. Ces corrélations dépendent de la phase et de la structure du cycle simulé prenant en compte les phénologies de type "hiver" et "printemps" dans des proportions relatives variables selon les scénarios.

2.2.1 Caractéristiques du double-pic simulé par ORCHIDEE-STICS et observé

2.2.1.1 Différences entre scénarios

Le résultat le plus apparent sur les quatre mailles agricoles sélectionnées (Fig. 2.10b., g., c. & e.) est la structure très nette en deux pics du LAI issu de la simulation CROP (courbe rouge). Ce double-pic est surtout visible dans les scénarios SOY et FEW. Dans le scénario NO, le deuxième pic dû à la croissance du maïs (puisque les cultures en C3 de printemps sont absentes) est négligeable. Dans le scénario NAT, le deuxième pic est très arrondi et le LAI ne descend pas à zéro en hiver, contrairement aux trois autres scenarios où le LAI est quasi-nul (au blé d'hiver près) pendant plusieurs mois (Novembre-Janvier). Le sol n'est en effet pas complètement nu à cette période de l'année dans la réalité, observée par satellite. Le scénario NAT, par sa couverture herbacée hivernale au LAI non nul, rend ainsi le modèle potentiellement plus réaliste sur ce point. Rappelons cependant que dans le DVI (courbe noire, invariante selon le scénario), c'est une valeur autour de 0.5 (et non 0) qui indique un sol nu. Cette valeur n'est atteinte que ponctuellement entre Décembre et Janvier en Beauce et dans l'Est de l'Allemagne (Fig. 2.10b. & g.). Le DVI journalier ne présentant pas de pic hivernal ni d'absence de cycle saisonnier (évoqués en section 2.1.3.1), contrairement au LAI mensuel (GIMMS) utilisé dans l'article Smith et al. [soumis], semble fiable pour comparer les cycles saisonniers simulés aux observations tout au long de l'année et de la série de 20 ans. De plus, la structure en double-pic apparaît également dans le DVI.

Cependant les double-pics de la simulation CROP sont tous plus abrupts que ceux observés par satellite. Ceci tient à ce que les conditions de simulations fixent, pour une même maille, une même date de semis (et de récolte) par type de culture. Or celle-ci est spatialement variable dans la réalité pour une zone équivalente d'environ $2500km^2$. Le satellite observe ainsi des débuts et fins de cycles plus échelonnés, résultant en un signal plus lissé, une fois agrégé à l'échelle $0.5^o \times 0.5^o$. Cette différence est moins remarquable dans le scénario NAT, où la recombinaison des résultats de la simulation CROP fait appel aux herbacées naturelles en C3. Leur développement n'est pas contraint par des facteurs techniques et leur cycle saisonnier est moins marqué (vu au chapitre 1, Fig. 1.4b.) que celui des cultures en C3 de printemps (Fig. 1.4d.).



FIG. 2.10 - DVI×10 (LSCE, noir) et LAI journaliers simulés dans CROP (rouge) et NoCROP (vert) comparés pour les scénarios SOY, NO FEW & NAT (de haut en bas) sur les mailles b. France-Beauce, c. France-Aquitaine, g. Allemagne-Est et e. Espagne-Sud (pourcentage d'agriculture d'après la carte de végétation du modèle dans chaque maille). Pour chaque maille, le DVI et le LAI NoCROP sont invariants dans les 4 prénarios.

Allemagne-Est (84.2%) g.

2.2.1.2 Différences entre régions

L'importance relative des deux pics de printemps et d'été du LAI simulé (avec prise en compte de l'agriculture) dépend :

- de la part relative des cultures d'hiver et de printemps dans chaque maille,
- de la façon dont la phénologie des cultures en C3 de printemps est représentée, et
- des conditions climatiques plus ou moins favorables aux phénologies de type "hiver" ou "printemps".

Les deux premiers facteurs sont les raisons d'être des quatre scénarios définis. Pour mettre en relief le troisième facteur, analysons par exemple la simulation CROP dans le scénario FEW¹⁵ des mailles de Beauce (Fig. 2.10b.) et d'Aquitaine (Fig. 2.10c.) en 1996 et 1998 : les proportions relatives des trois types de cultures sont, d'après la carte de végétation, les mêmes sur les deux mailles (Tab. 2.2) et les fractions totales agricoles égales à 2% près. Or les LAI individuels des trois types sont visiblement plus élevés en Aquitaine, conduisant à un LAI par maille qui atteint des valeurs "plateau" plus élevées (4.5 en 1996 et 4 en 1998 vs. 3.5 et 3, pour le premier pic). Ceci peut s'expliquer par le fait que les températures sont, plus favorables en Aquitaine qu'en Beauce pour les trois PFT et que la phénologie d'ORCHIDEE-STICS y répond. La réponse du LAI dépend de la combinaison entre chaleur efficace du jour et stade du cycle (vu au chapitre 1 en section 1.2.1.1, équation 1.2.1.1), qui dépend lui-même de la chaleur accumulée depuis le semis. Les températures favorables (comprises entre T_0 et T_{max}) permettent l'accumulation rapide d'unités de chaleur donc le passage rapide de la phase juvénile à la suivante, où le développement foliaire est favorisé, d'après la fonction logistique f(U) donnant l'incrément de LAI (relatif à son maximum par jour) en fonction du parcours de développement. L'effet complexe de la température est tel que l'accroissement du LAI est plus important en Aquitaine bien que la saison de croissance soit raccourcie. Cette réponse en terme de niveau maximum de LAI atteint différent dans deux régions n'est pas visible dans le DVI, dont on rappelle que son cycle est plus lisse car il agrège l'hétérogénéité réelle intra-maille, et que ses valeurs de maximum ne devraient pas être interprétées. ORCHIDEE-STICS quant à lui, exagère certainement la variabilité (temporelle et spatiale) du LAI par le fait que les formalismes d'un modèle, en général, ne prennent pas en compte l'ensemble des processus réels. Ses résultats sont par conséquent relativement plus sensibles aux paramètres des processus qui sont modélisés, que ne le sont les grandeurs réelles.

TAB. 2.2 – Fractions relatives (%) des PFT agricoles en C3 d'hiver, C4 et C3 de printemps au sein de l'agriculture totale des mailles France-Beauce, France-Aquitaine, Espagne-Sud et Allemagne-Est, selon la carte de végétation initiale du modèle (scénario SOY).

		C3 "hiver"	$\mathbf{C4}$	C3 "printemps"
b.	France-Beauce	41	13	46
c.	France-Aquitaine	41	13	46
$\mathbf{g}.$	Allemagne-Est	38	3	59
е.	Espagne-Sud	15	3	82

Malgré l'homogénéité des dates de semis prescrites sur les mailles d'Europe, le LAI simulé croît en 1996 et 1998, plus tôt en Aquitaine (Fig. 2.10c.) qu'en Beauce (Fig. 2.10b.) (Janvier vs. Mars pour le pic des cultures d'hiver et Juin vs. Juillet pour celui des cultures de printemps). Le cycle se termine de même plus tôt en Aquitaine : fin Septembre, sans pour autant avoir été tronqué par la date butoir de récolte, contre mi- et fin Octobre où il est légèrement tronqué en Beauce. Le LAI atteint le plateau plus en avance en Aquitaine qu'en Beauce (Mai vs. Juin pour le 1^{er} pic, Fig. 2.11c.). Le satellite voit le même décalage temporel dû au climat respectif des deux régions, indiquant qu'ORCHIDEE-STICS capture correctement ces différences régionales de

 $^{^{15}\}mathrm{L'interprétation}$ est la même dans les 3 autres scénarios

phénologie¹⁶ (Fig. 2.11a.). La part de variabilité spatiale qui n'est pas d'origine climatique mais liée aux pratiques culturales dans la réalité ne peut être reproduite dans les simulations réalisées sans flexibilité des calendriers de semis et récolte ; cependant, cette erreur est considérée comme étant a priori de second ordre par rapport à l'amélioration apportée au modèle originel. Les dates de LAI maximum retenues dans la simulation CROP sont celles marquant le début du plateau, celui-ci pouvant durer plus d'un mois. Elles sont dans l'ensemble plus précoces que celles observées, qui correspondent à une date unique car le cycle de DVI ne présente pas de plateau marqué.

En 1997, en Aquitaine, le LAI maximum atteint par les cultures d'hiver (premier pic) s'avère beaucoup plus faible que celui obtenu en 1996 et 1998. Il est même inférieur à celui atteint en Beauce. Le résultat obtenu sur l'avance du cycle saisonnier reste vrai en 1997. Si les conditions climatiques n'ont vraisemblablement pas été favorables en 1997 au développement des cultures d'hiver dans ORCHIDEE-STICS, elles l'ont en revanche visiblement été pour les cultures de printemps, d'après le satellite, sur les 4 régions d'Europe représentées en figure 2.10. Le deuxième pic, du mois d'Août (Fig. 2.10c. & e.) ou Septembre (Fig. 2.10b. & g.) apparaît en effet plus prononcé dans le DVI en 1997 que les deux autres années. On a vu que 1997 est la seule année ou un double-pic est détectable dans le LAI GIMMS mensuel dérivé des mêmes mesures AVHRR (Fig. 2.3c et Fig. 1 dans Smith *et al.* [soumis]). Il est perturbant que se signal, aussi visible dans les données lissées, ne se retrouve pas dans la simulation CROP (ou très peu, ex. Fig. 2.10b. & g., scénario SOY); d'autant qu'il est peu probable que sa cause soit autre que climatique (incitation économique à l'interculture?). Une explication possible au fait qu'ORCHIDEE-STICS ne montre pas de réponse particulière des cultures de printemps en 1997 est que le forçage climatique utilisé ne possède lui-même pas d'anomalie. Je n'ai pas testé cette hypothèses.

Un autre point mérite d'être signalé : le cycle observé par satellite montre une nette dominance des cultures d'hiver en Beauce (Fig. 2.10b.) et plutôt un équilibre entre les deux types de cultures en Aquitaine (Fig. 2.10c.). On a fait ce même constat en section 2.1.3.1 et dans l'article Smith *et al.* [soumis] avec le LAI GIMMS, partie II.A.1. Ceci suggère que la carte de végétation utilisée pour les simulations d'ORCHIDEE-STICS attribue aux cultures de printemps (dont le maïs) une fraction relative de surface trop forte en Beauce et trop faible en Aquitaine (Tab. 2.2). La carte de végétation utilise les fractions relatives données par Leff *et al.* [2004] et basées sur des pourcentages nationaux (*cf.* chapitre 1, section 1.3.3.3, Fig. 1.6). Elle ne prend donc pas en compte les différences régionales d'assolement, seul le pourcentage agricole total par maille fait varier les surfaces occupées par chaque culture dans le modèle. Ce n'est par conséquent pas une surprise si le scénario NO, repéré comme étant le plus réaliste en Beauce ($R^2 = 0.48$), est le moins bon en Aquitaine ($R^2 = 0.40$).

2.2.2 Apport d'ORCHIDEE-STICS par rapport à ORCHIDEE

D'après la figure montrant les cycles saisonniers 2.10g., on voit clairement que le scénario SOY n'est pas réaliste en Allemagne de l'Est. La simulation CROP n'apporte quasiment aucune amélioration de la corrélation avec le signal satellite ($R^2 = 0.12$) par rapport à la simulation No-CROP ($R^2 = 0.10$). Le signal satellite voit un pic principal en juin (soit une grande contribution des cultures d'hiver) tandis que la simulation CROP présente un pic principal en août-septembre (soit une grande contribution des cultures de printemps) dans la situation initiale SOY. Ainsi, les scénarios NO et FEW, qui considèrent une plus grande fraction de cultures d'hiver, améliorent la corrélation des cycles simulés avec les données (resp. $R^2 = 0.36$ et $R^2 = 0.39$). Cependant, la cause n'en est peut-être pas seulement un problème d'occupation trop restreinte des cultures d'hiver dans la carte de végétation (Tab. 2.2). Ce peut aussi être un problème de développement de ce PFT dans le modèle pour cette région. en effet, si l'on compare les scénarios NO des mailles Allemagne-Est (Fig. 2.10g.) et Espagne-Sud (Fig. 2.10e.), qui ont les mêmes fractions totales

¹⁶Ce résultat dépend peu du scénario de répartition des proportions de cultures en C3 d'hiver et de printemps par maille



FIG. 2.11 – Date (jour de l'année) de l'année 1996 d'occurence du maximum de DVI **a.** ou de LAI simulé dans NoCROP **a.**, le scénario NO **c.** et le scénario SOY **d.** de la simulation CROP. Dans NO c'est la date du 1^{er} pic et dans SOY la date du 2^{me}. Le jour 80 marque la fin-Mars et le jour 260 la mi-Septembre. La couleur bleu foncé indique la fin-Avril, vert clair le début-Juillet et orange, le début-Août. Dans les figures **b.-d.** correspondant au modèle, les surfaces cultivées à <25% sont masquées. Dans la figure **d.**, les mailles de couleur verte (Bretagne, Massif Central & Sicile) sont dûes à l'artéfact que constitue l'absence de données pour ces zones dans Leff et al. [2004] et par conséquent l'absence de cultures en C3 de printemps dans la carte de végétation du modèle basée sur ces données. C'est le 1^{er} pic, des cultures d'hiver, qui apparaît en vert (identique à la figure **c.**).

de cultures en C3 ("hiver"+"printemps"=97%, toutes représentées par le blé dans ce scénario), on voit que les cultures d'hiver poussent très bien en Espagne (LAI \approx 6) et plutôt mal dans l'Est de l'Allemagne (LAI \approx 2). Le cas de l'Espagne reste difficile à interpréter. Du côté de la simulation CROP, il est possible qu'il manque un facteur de stress particulier aux zones à fortes températures. Du côté des données, il a déjà été noté que la péninsule ibérique est sujette à de fortes incertitudes.

Indépendamment de leur amplitude (qui fait varier les niveaux de corrélation selon les scénarios), notons que les double-pics de la simulation CROP (Fig. 2.10**b.**, **c.**, **g.** & **e.**) sont en phase avec ceux des données satellitaires (d'Avril à Juin, selon la latitude, pour celui des cultures d'hiver, de Juillet à Septembre pour celui des cultures de printemps). En revanche, les maxima annuels obtenus dans la simulation NoCROP sont la plupart du temps en décalage et de surcrôît très irréguliers d'une année sur l'autre (par exemple Novembre, Mars, Juillet, Janvier entre 1996 et 1998, Fig. 2.10**b.**). La figure 2.11 montre à l'échelle de l'Europe, en 1996, la grande différence de phasage du maximum de LAI entre la simulation NoCROP d'une part et le DVI et le 1^{er} pic de la simulation CROP d'autre part. Bien que détectable, le gradient de phénologie Sud-Ouest Nord-Est est moins homogène dans la simulation sans agriculture. Le LAI est atteint son maximum trop tard dans la saison par rapport aux observations. Dans des zones très localisées (Aquitaine, Plaine du Pô, Pays-Bas) la carte des dates de maximum de DVI présente des similitudes avec celle de la date du 2^{me} pic, suggérant la combinaison des scénarios pour atteindre un meilleur accord modèle-données.

Le début et la fin de saison de croissance sont beaucoup plus réguliers dans la simulation CROP que dans NoCROP; ils définissent ainsi une saison de sol agricole nu (Novembre à Février pour les deux mailles du Nord (Fig. 2.10b. & g.) et Octobre à Janvier pour les deux du Sud (Fig. 2.10c. & e.) qui inclut le minimum du signal satellitaire, mais pas toujours celui de la simulation NoCROP. La grande variabilité dans la phénologie des herbacées pseudo-agricoles d'ORCHIDEE révèle que les critères thermiques et hydriques décrits en section 1.2.1.1 du chapitre 1 sont satisfaits à des dates variables d'une année sur l'autre. Ces dates ne dépendent que des conditions intégrées sur les quelques semaines qui précèdent, ce qui peut convenir pour les herbacées naturelles. Toutefois, dans la réalité, les agriculteurs ne se basent pas uniquement sur les conditions récentes pour décider de semer. Ils ont une vision à plus long terme qui intègre leur connaissance passée du milieu sur plusieurs dizaines d'années et leur planification en fonction de contraintes économiques et matérielles, et anticipation en fonction des prévisions agricoles.

La corrélation calculée sur l'ensemble de la série journalière de 18 ans (1982-1999, hiver inclus), permet de mesurer, vis-à-vis des données satellitaires, l'impact de la représentation des surfaces cultivées dans le modèle par comparaison entre la simulation NoCROP et les quatre variantes de la simulation CROP. La figure 2.12 montre les coefficients de corrélation obtenus pour chacun des scénarios sur les quatre mailles avec le jeu de données journalier (DVI LSCE **a.**) et le jeu mensuel (LAI GIMMS **b.**). Précisons que les corrélations obtenues avec les observations mensuelles ont nécessité la reconstitution d'une série mensuelle à partir des simulations journalières. Pour cela, le LAI maximum de chaque mois a été retenu, étant donné que le LAI GIMMS provient de MVC. Sur aucune des mailles, et quel que soit le jeu de données satellitaires utilisé, les scénarios NoCROP (bâtons verts) ou SOY (bâtons rouges) ne ressortent comme étant les mieux corrélés aux données. La simulation sans agriculture (NoCROP) est même en général la moins bonne. Ceci est une première observation dont la validité à l'échelle de l'Europe est vérifiée dans la dernière partie de ce chapitre (??). La différence absolue entre corrélations (R^2) obtenues avec le LAI (Fig. 2.12a. et le DVI (Fig. 2.12b.) est de 0.09 en moyenne sur les dix mailles agricoles étudiées (tous scénarios confondus). Les différences les plus importantes sont relevées sur la maille de Beauce. Pour chaque maille, la différence entre les deux signaux satellitaires fait que le classement des scénarios, en fonction de leur niveau de corrélation aux données, peut être différent. Pour une même maille, ce n'est pas forcément le même scénario qui est retenu



FIG. 2.12 – Corrélation entre le DVI LSCE (haut) ou le LAI GIMMS (bas), tous deux dérivés des données AVHRR, et le LAI simulé dans l'expérience initiale de référence NoCROP (vert) et les scénarios SOY (rouge), NO (violet), FEW (orange) et NAT (jaune) de l'expérience CROP, pour les mailles France-Beauce, France-Aquitaine, Espagne-Sud et Allemagne-Est. Le calcul a été fait sur les séries 1982-1999 journalière de DVI ou mensuelle de LAI (GIMMS) vs. celle journalière ou mensuelle de LAI simulé.

comme générant la meilleure amélioration du modèle, selon le jeu de données satellitaires auquel il est comparé. Sur la maille Allemagne-Est par exemple, la corrélation au LAI GIMMS donne le scénario NO meilleur et celle au DVI LSCE le scénario FEW (Fig. 2.12).

La corrélation n'a pas été calculée sur les cycles moyens simulés et observés. On a vu qu'un calcul sur le cycle moyen absorbe la variabilité inter-annuelle dans les simulations et observations, et améliore la corrélation en l'absence de biais systématique (Fig. 2.8). Ce mode de calcul rapprocherait des observations les scénarios de la simulation CROP, par rapport au calcul sur la série entière. La simulation NoCROP serait mieux corrélée aux observations également. Mais sachant que la variabilité inter-annuelle du cycle de LAI a été identifiée comme plus importante dans NoCROP, cette simulation serait favorisée relativement à la simulation CROP dans le calcul de la corrélation sur le cycle moyen. L'amélioration apportée par la prise en compte des cultures serait artificiellement diminuée. En choisissant comme valeur annuelle représentative du cycle saisonnier foliaire la date correspondant aux indices maxima, on peut calculer la corrélation entre les séries de dates obtenues, pour estimer le phasage entre la variabilité inter-annuelle simulée et observée. Sur les mailles d'Aquitaine et dans l'Est de l'Allemagne par exemple, la corrélation (R^2) entre les 18 dates observées et simulées avec agriculture est meilleure que sans agriculture (resp. 0.46 et 0.36 CROP, contre 0.20 et 0.15 NoCROP).

Les mailles sur lesquelles la comparaison des cycles saisonniers simulés et observés vient d'être faite étant agricoles à plus de 80%, l'impact de la prise en compte des cultures avec ORCHIDEE-STICS sur le LAI simulé est très visible, bien que l'analyse ait été menée tous types de végétation confondus. Cette analyse agrégeant les types de végétation naturels et agricoles suit l'optique d'adapter les résultats de simulation pour en faire des grandeurs comparables aux observations, plutôt que le contraire. Il est vrai cependant que ce qu'on appelle ici observation n'est en réalité pas la mesure initiale effectuée par le satellite (réflectance) mais le résultat d'un traitement complexe brièvement décrit en début de ce chapitre (sections 2.1.1 et 2.1.2). Dans le but de quantifier l'amélioration sur l'ensemble de l'Europe, incluant des mailles moins cultivées, on a envisagé de désagréger le signal satellitaire pour en extraire la part attribuée aux surfaces cultivées. Cette décomposition du signal a été faite de facon indépendante de la méthode d'agrégation du LAI des différents PFT du modèle au moyen de la carte de végétation. Sinon, les résultats de l'opération seraient identiques à ceux de l'étude déjà menée tous types de végétation confondus. C'est le jeu de DVI qui a été retenu pour la désagrégation, en raison de sa résolution spatio-temporelle fine et de la collaboration directe avec les personnes ayant travaillé à leur correction des effets directionnels [Bacour & Breon, 2005; Bacour et al., 2006; Maignan et al., 2008].

2.3 Extraction de la contribution des surfaces cultivées au DVI

Du côté du modèle, la consitution d'un LAI "cultures seules" est simple : au lieu d'agréger, pour chaque maille de $0.5^{o} \times 0.5^{o}$ d'ORCHIDEE-STICS, les LAI de tous les PFT comme dans la section précédente, on n'agrège que les LAI des 3 PFT agricoles. Ce choix de rendre le cycle saisonnier de LAI simulé pour les cultures (et pseudo-cultures de références) indépendant de la phénologie des PFT naturels a donc un impact inversement proportionnel à la fraction occupée par l'agriculture dans chaque maille. Il permet de s'affranchir de l'incertitude liée aux désaccords potentiels, variables dans le temps et dans l'espace, entre données et simulation du modèle pour la végétation naturelle. La qualité des résultats obtenus pour la végétation naturelle n'a été ni modifiée ni évaluée dans mon travail axé sur les surcafes cultivées.

2.3.1 Méthodologie utilisant deux cartes d'occupation du sol

Du côté des données, le DVI est par nature déjà un signal moyen intégrant différents types de couverts, mais sa résolution originelle ($\approx 8km \times 8km$) est beaucoup plus fine que $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. En regrillant les DVI à la résolution du modèle, j'ai choisi de ne conserver, parmi les signaux à 8km de résolution qui composent celui d'une maille de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (au nombre de ≈ 25), que ceux provenant des surfaces dominées par l'agriculture. Pour déterminer si un signal peut être retenu comme représentant la phénologie agricole, un seuil arbitraire de 75% est communément admis¹⁷ : On dispose de deux cartes d'occupation du sol à la résolution de $\approx 1 km \times 1 km$, MODIS (section ??) et PELCOM (chapitre 1, section 1.3.3.1), toutes deux déjà évoquées, où chaque maille appartient à une seule catégorie (Fig. 2.13a. et b.). PELCOM propose 16 catégories et MODIS 9 (dont les 7 biomes de végétation, l'eau et les zones urbaines). En regroupant les catégories "Rainfed arable land", "Irrigated arable land" et "Permanent crops" de PELCOM et "Broadleaf crops" et "Grasses and cereal crops" de MODIS On reconstitue une sur-catégorie "cultures" pour chacune des deux cartes. Le nombre de points (à $\approx 1 km \times 1 km$) appartenant à cette sur-catégorie "cultures" rapporté au nombre de points total dans une boîte de 8km donne le pourcentage (Fig.2.14a. gauche & droite) qu'on confronte au seuil de 75%. La figure 2.14b. montre les fractions de surface occupées par les cultures après changement de projection (de ALBERS¹⁸ à GOODE¹⁹ AVHRR) et de résolution spatiale (de celle des DVI, 8km, à celle des LAI d'ORCHIDEE-STICS, 0.5°), pour chacune des deux cartes. Ces deux cartes sont de format homogène avec celle qu'on obtient en visualisant la fraction agricole totale $(\Sigma_{PFT=11}^{13} f S_{max,PFT})$ issue de la carte de végétation du modèle. La figure 2.14c. présente le pourcentage de de signaux satellitaires à 8km retenus (s'ils respectent la condition de repésenter une surface cultivée à >75%) pour constituer le DVI "cultures seules" à 0.5° de résolution.

La comparaison des deux cartes de la fraction agricole à $8km \times 8km$ (Fig.2.14a.) révèle un bon accord dans les zones fortement agricoles que sont l'Aquitaine, la Plaine du Pô, les Balkans et le Nord-Est de notre fenêtre européenne. En revanche la carte PELCOM indique une présence de surface cultivées plus importante que MODIS en Espagne et plus faible que MODIS dans les Iles Britanniques et le Nord-Ouest de la France. Ceci peut se comprendre au regard des cartes originelles de biomes (Fig. 2.13a. et b.). En effet, MODIS classe en Espagne la végétation dans les catégories "Shrubs" (végétation arbustive) et "Savannas" alors que PELCOM classe cette même végétation dans les catégories "Permanent crops", "Rainfed arable land", "Irrigated arable land". Ceci a pour conséquence que la plupart de la végétation espagnole est exclue de la nouvelle sur-catégorie "cultures". Concernant les Iles Britanniques, MODIS classe la végétation dans la catégorie "Grasses and cereal crops" alors que PELCOM sépare "Grassland" et "Rainfed arable

 $^{^{17} \}rm{Des}$ tests faisant varier le seuil de 50 à 80% ont montré une faible variabilité dans le résultat [Comm. pers. Maignan, 2007]

¹⁸Albers Equal Area Conic, British Columbia Albers Standard Projection, MSRM GIS Working Group, 1994, http://srmwww.gov.bc.ca/gis/bceprojection.html

¹⁹Interrupted Goode homolosine projection, 1923







FIG. 2.13 – Données d'occupation du sol (types de végétation et autres types de surfaces) **a.** MODIS et **b.** PELCOM à $\approx 1km \times 1km$.



FIG. 2.14 – Fraction agricole totale à **a**. 8km et **b**. 0.5° de résolution, selon la carte MODIS (à gauche) et PELCOM (à droite), après agrégation des données originelles à $\approx 1 \text{km} \times 1 \text{km}$. **c**. Fraction des DVI à 8km × 8km retenus après filtrage des cultures au seuil de 75%.

land". Les prairies et autres zones herbacées sont ainsi intégrées à la sur-catégorie "cultures" dans MODIS. Malgré ces différence spatiales, les valeurs moyennes sur l'Europe (fenêtre de la figure 2.14) restent proches (41% pour PELCOM et 46% pour MODIS). La comparaison des deux cartes à la résolution agrégée $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (Fig.2.14b.) n'apporte pas d'information supplémentaire mais le pourcentage de cultures devient directement comparables à celui de la carte de végétation d'ORCHIDEE-STICS (Fig. **??a.**), où les surfaces cultivées représentent en moyenne sur l'Europe 40%. Leur distribution spatiale s'apparente plus à celle issue de la carte PELCOM qu'à celle issue de la carte MODIS. Ceci est compréhensible car par construction, la carte de végétation du modèle combine les données de PELCOM à celles de CORINE LANDCOVER 2000 (chapitre 1, section 1.3.3.1).

Considérons maintenant les cartes, non pas de fractions agricoles "réelles" (observées), mais du taux de signaux satellitaires retenus pour représenter la phénologie agricole du le DVI "cultures seules" (Fig.2.14c.) : ces fractions sont environ d'un tiers plus faibles (27% en moyenne sur l'Europe dans les deux cas). Ceci signifie, qu'avec le seuil fixé à 75%, une grande partie de l'information satellitaire n'est pas utilisée. Par exemple le DVI d'une maille de $8km \times 8km$ qui contient 70% de points classés dans les "cultures" est ignoré au même titre qu'un DVI d'une maille en contenant 20%. Il aurait pu être envisagé de diminuer le seuil pour utiliser plus de signaux satellitaires. Ceux-ci seraient en conséquence "parasités" dans une plus grande mesure par la phénologie de la végétation naturelle réelle, contribution jusqu'ici limitée à 25% au maximum. J'ai choisi de préférer la relative pureté du signal "cultures seules" à une maximisation de son exploitation, en se basant sur l'hypothèse qu'au sein d'une maille de $0.5^{o} \times 0.5^{o}$, les signaux retenus sont bien représentatifs de l'ensemble des surfaces agricoles.

2.3.2 Comparaison des séries de DVI filtrés obtenues

La figure 2.15 compare sur 5 mailles de $0.5^{o} \times 0.5^{o}$ le cycle saisonnier des DVI "cultures seules" entre eux (carte PELCOM vs. MODIS) et avec celui du DVI "toute végétation" (courbe noire comparée précédemment au LAI GIMMS en figures 2.3, 2.4 et 2.5 et aux LAI simulés en figure 2.10). 4 des 5 mailles font partie des 11 sélectionnées précédemment. Les 3 premières sont fortement cultivées d'après le modèle et la 4^{me} faiblement. La 5^{me} (surnommée Autriche, 16.25°E47.75°N) a été choisie pour sa fraction cultivée intermédiaire d'après le modèle (44 %).

Le DVI "cultures seules" filtré via la carte PELCOM n'est pas visible car superposé au DVI "toute végétation" sur les trois premières mailles : Beauce, Nord et Sud de l'Espagne (Fig. 2.15b. & **d.-e.**). Ceci est cohérent avec le fait que quasiment tous les DVI à 8km ($\geq 81\%$, Tab. 2.3) ont été retenus sur ces mailles pour composer le DVI "cultures seules". Ces mailles sont agricoles à 88-97% d'après la carte PELCOM (Tab. 2.3) et à 93-94% agri dans le modèle. La corrélation (calculée sur les séries entières et sur le cycles moyens) entre le DVI filtré via la carte PELCOM et le DVI "toute végétation" atteint ≈ 1 sur ces trois mailles.

Sur la maille du Massif Central au contraire, le DVI filtré via la carte PELCOM est inexistant (Fig. 2.15k.). Ceci est dû à ce qu'aucune des mailles de $8km \times 8km$ qui la compose ne contient plus de 75% d'agriculture et aucun DVI n'est par conséquent retenu (Tab. 2.3). L'agriculture n'occupe que 2% de la surface de la maille d'après la carte PELCOM (Tab. 2.3) et 5% dans le modèle.

Sur la Beauce (Fig. 2.15b.), le DVI "cultures seules" filtré via la carte MODIS est lui aussi superposé au DVI "toute végétation" ($R^2 \approx 1$) grâce à 96% de cultures et 91% des DVI à 8km retenus (Tab. 2.3); La constatation est la même sur les 7 autres mailles sélectionnées pour leur forte composition en surfaces cultivées d'après la carte de végétation du modèle (non illustré).

C'est sur les 3 mailles du Nord et du Sud de l'Espagne et du Massif Central (Fig. 2.15d.-e. & k.) que le DVI filtré via la carte MODIS se détache des deux autres DVI, illustrant l'impact



b. France-Beauce



de l'extraction de la part de signal satellitaire attribuée aux cultures. La part des DVI à 8km retenus est très faible ($\leq 6\%$, Tab. 2.3) et la différence potentielle entre le DVI "cultures seules" résultant et le DVI "toute végétation" par conséquent grande. L'agriculture occupe 26-30% de la surface de ces 3 mailles d'après la carte MODIS (Tab. 2.3), ce qui est faible sur l'Espagne et fort sur le Massif Central par rapport à la carte PELCOM et à la carte de végétation du modèle.

TAB. 2.3 – Fractions (%) de cultures dans la carte de végétation du modèle (Fig. 2.9a.) et dans les cartes MODIS et PELCOM et à $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (Fig. 2.14b.), et fractions des DVI à 8km × 8km retenus après filtrage des cultures au seuil de 75% selon MODIS et PELCOM pour constituer le signal "cultures seules" (Fig. 2.14c.), données ici pour les mailles France-Beauce, Espagne Nord, Espagne-Sud, France-Massif-Central (MC) et Autriche. On affiche en italique entre parenthèses la répartition des % de cultures entre ses catégories constitutives dans les données MODIS et PELCOM.

		% cultures			% DVI retenus	
		Modèle	$\begin{array}{c} \mathbf{MODIS} \\ (G \mathscr{C} C C^1, B C^2) \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathbf{PELCOM} \\ (RAL^3, IAL^4, PC^5) \end{array}$	MODIS	PELCOM
b.	France-Beauce	93	96 (75, 21)	$\begin{array}{c} 91\\(91,\ 0,\ 0)\end{array}$	91	86
d.	Espagne-Nord	94	$\begin{array}{c} 26 \\ (16, 10) \end{array}$	$\begin{array}{c c}97\\(77,\ 20,\ 0)\end{array}$	4	98
e.	Espagne-Sud	93	$\begin{array}{c} 30 \\ (22, 8) \end{array}$	$\frac{88}{(29, 2, 57)}$	5	81
k.	France-MC	5	$\begin{array}{c} 30 \\ (23, 7) \end{array}$	$\begin{array}{c} 2\\(\textit{2},\textit{0},\textit{0})\end{array}$	6	0
1.	Autriche	44	$\begin{vmatrix} 32\\(29, 3) \end{vmatrix}$	$ \begin{array}{c c} 39 \\ (38, 0, 1) \end{array} $	18	16

 $^1Grasses \ {\ensuremath{\mathcal E}}\ Cereal \ Crops$

²Broadleaf Crops

³Rainfed Arable Land

⁴Irrigated Arable Land

⁵Permanent Crops

Ces résultats suggèrent que le DVI filtré via la carte MODIS serait théoriquement moins comparable aux LAI "cultures seules" simulés par ORCHIDEE-STICS (et agrégés à partir de la carte de végétation du modèle) que ne le serait le DVI filtré via la carte PELCOM. Ce dernier différencie en effet de la même façon que le modèle, la maille peu agricole du Massif Central (Fig. 2.15k.) des autres mailles fortement agricoles (Fig. 2.15b. & d.-e.). Toutefois, le DVI filtré via la carte MODIS montre sur l'Espagne, zone de désaccord déjà soulevée par la figure 2.14, un signal plus marqué. Un pic secondaire apparaît en Août dans le DVI "cultures seules" (MODIS) du Nord de l'Espagne (Fig. 2.15d.), alors qu'il est réduit à une légère rupture de pente en fin d'été sur la courbe du DVI "toute végétation". De même, les deux pics de Mai et Août sont accentués dans le DVI "cultures seules" (MODIS) du sud de l'Espagne (Fig. 2.15e.). Ce double-pic est typique de la phénologie agricole, d'autant plus que les cultures sont irriguées et supportent ainsi mieux les conditions estivales espagnoles que la végétation naturelle. L'extraction du DVI "cultures seules" via la carte MODIS modifie le signal satellitaire dans un sens qui augmenterait la corrélation modèle-données sur l'Espagne, car on rappelle que les double-pics simulés par ORCHIDEE-STICS sont très marqués (Fig. **??e.**).

Sur le Massif Central (Fig. 2.15k.) on constate que le DVI "cultures seules" (MODIS) est plus faible en hiver et plus fort en été que le DVI "toute végétation". Les deux pics restent toutefois visibles et sont décalés à Juin et Septembre, en raison du climat qui ne permet pas une accu-

a. calcul / anomalies journalières b. calcul / cycles moyens

R^2 DVI "cultures seules" PELCOM vs. MODIS

FIG. 2.16 – Coefficient de corrélation entre les deux séries de DVI "cultures seules", obtenues avec les cartes MODIS et PELCOM, calculé sur les anomalies journalières (cycles saisonniers moyens soustraits de chaque année de 1982-1999) **a.** et sur les cycles moyens **b.**. Les zones en blanc correspondent aux mailles de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, ne contenant aucune maille de $8km \times 8km$ dans laquelle la sur-catégorie "cultures" occupe plus de 75% de la surface d'après l'une ou l'autre carte. Le masque que ces zones définissent combine les masques des deux cartes (zones en bleu turquoise sur les figures 2.14**c.** gauche et droite).

mulation de chaleur aussi rapide qu'en Espagne. Le DVI "cultures seules" plus faible en hiver est probablement dû à une période de sol nu hivernale après la récolte des cultures alors que les herbacées, dont la phénologie est observée dans le DVI "toute végétation", persistent (29% de "Savannas" (Sa) d'après la carte MODIS, Tab. 2.1). La plus grande productivité estivale des cultures est certainement à l'origine du DVI "cultures seules" plus élevé en été.

La corrélation entre le DVI filtré via la carte MODIS et le DVI "toute végétation" (ou le DVI filtré via la carte PELCOM qui lui est superposé, lorsque'il existe) reste élevée sur les 3 mailles d'Espagne et du Massif Central : 80-90% sur les séries entières et 94-97% sur les cycles moyens. La différence entre ces deux fourchettes de chiffres n'est pas dûe à une variabilité inter-annuelle des surfaces agricoles ou fractions de signaux satellitaires retenus (le filtre à 75% étant appliqué sur toute la série temporelle de la même façon). La différence est dûe à la variabilité inter-annuelle du cycle saisonnier des "cultures seules" ("parasitées" au plus par 25% de végétation naturelle), qui est différente de celle du cycle de la végétation naturelle inclue dans le DVI "toute végétation". Les % manquants pour atteindre une corrélation de 1 sont dûs à la modification du cycle moyen du DVI par l'isolation de la part des cultures.

Sur la maille Autriche (Fig. 2.151.), les DVI filtrés via les cartes MODIS et PELCOM sont quasi-identiques ($R^2 \approx 1$), comme sur la Beauce et contrairement à ce qui a été noté pour les 3 mailles d'Espagne et du Massif Central. Cet accord est dû au fait que le taux de signaux à 8kmretenus selon les deux cartes est très proche (16-18%, Tab. 2.3). Mais contrairement au cas de la Beauce très cultivée, les DVI "cultures seules" de l'Autriche moyennement cultivée (à 44%, 32% & 39%, d'après le modèle, les cartes MODIS & PELCOM respectivement, Tab. 2.3) se détachent du DVI "toute végétation", auquel ils restent corrélés à 89 et 94% (sur les séries entières et sur les cycles moyens respectivement).

A l'échelle de l'Europe, sur les zones communes²⁰ où des cultures occupent d'après les cartes

 $^{^{20}}$ Les zones sans valeur de corrélation calculée (ex. massifs montagneux, Ouest des Iles Britanniques et Nord-Ouest de la Péninsule Ibérique, Fig. 2.16) résultent de l'absence de mailles de $8km \times 8km$ cultivées à plus de 75% dans l'une des deux cartes. La maille du Massif Central s'est trouvée ainsi exclue.

MODIS et PELCOM, plus de 75% de la surface d'au moins 1 des mailles de $8km \times 8km$ qui composent les mailles de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, la corrélation entre les cycles moyens des deux DVI "cultures seules" est excellente ($\geq 95\%$, Fig. 2.16b.). Cette corrélation est excellente même sur des zones peu cultivées d'Europe, pour peu que la condition des 75% ait été respectée à l'échelle de $8km \times 8km$. Ce résultat indique que les filtres basés sur la sur-catégorie "cultures" reconstituée à partir des deux cartes différentes MODIS et PELCOM ont conduit à des DVI "cultures seules" de cycles saisonniers très semblables.

Les corrélations un peu plus faibles sur les côtes méditerranéennes (Espagne & Italie, Fig. 2.16b.) sont une conséquence du problème déjà soulevé de définition divergente des classes d'occupation du sol, conduisant à des fractions de cultures différentes. Le choix d'intégrer la catégorie PELCOM de cultures pérennes (PC) à la sur-catégorie "cultures" joue un rôle dans ces différences de fractions dans le sud de l'Espagne. Par exemple sur la maille **e**., la catégorie PC couvre 57% de la surface d'après la carte PELCOM (Tab. 2.3). C'est ce chiffre (nul pour les autres mailles) qui creuse la différence avec la fraction de cultures dans la même maille d'après la carte MODIS. En effet, ces cultures pérennes, comme les oliviers et arbres fruitiers, ont été comptabilisées dans la végétation arbustive (Sh) de la carte MODIS et ne font donc pas partie de la sur-catégorie "cultures" d'après cette dernière. On aurait pu exclure la catégorie PC de la sélection étant donnée sa nature ligneuse. Cependant, en vue d'une comparaison des DVI "cultures seules" aux LAI simulés pour les PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS, l'idée était de représenter les mêmes surfaces que celles qui ont été classées comme agricoles dans la carte de végétation du modèle (CORINE+PELCOM). La discussion concernant les différentes catégories de végétation que doivent ou non représenter les 3 PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS est encore ouverte.

Les différences entre les cartes MODIS et PELCOM ont plus d'effet sur la corrélation des anomalies journalières des DVI "cultures seules" (Fig. 2.16a.) que sur celle de leurs cycles moyens. La corrélation des anomalies reste excellente ($\geq 90\%$) sur les zones fortement agricoles communes aux deux cartes (Nord-Ouest de la France, Sud-Est de la Grande-Bretagne, Pologne, Hongrie, côte Adriatique de l'Italie, localement en Allemagne et Espagne). Ces anomalies sont en revanche moins bien phasées sur une grande partie de l'Allemagne et dans la vallée du Rhône, zones peu cultivées dont les cycles saisonniers moyens sont bien corrélés, ainsi que sur l'Espagne et la côte méditerranéenne de l'Italie où le biais persiste entre les cycles saisonniers moyens.

A ce stade, et compte-tenu de la bonne corrélation générale entre les deux jeux de DVI "cultures seules", il ne semble pas nécessaire de conserver les deux pour la suite des analyses. C'est celui basé sur la carte PELCOM que j'ai choisi pour la comparaison aux LAI "cultures seules" simulés par ORCHIDEE-STICS, au vu de sa meilleure adéquation théorique avec les surfaces agricoles considérées dans le modèle et leur composition en classes. Le fait que ce soit la carte MODIS qui ait été utilisée en amont par Bacour *et al.* [2006] pour corriger les réflectances AVHRRR des effets directionnels et produire les DVI LSCE n'est pas incompatible [Comm. pers. Maignan, 2007]. La qualité des corrélations entre modèle et données en mode "cultures seules" (non "parasité" par la phénologie des PFT naturels) est analysée à l'échelle européenne en partie suivante (2.4.2.1), en parallèle de l'analyse des corrélations en mode "toute végétation" (partie 2.4.1). Différents diagnostics sont ensuite comparés et discutés en vue de quantifier sur l'Europe l'amélioration de l'ajustement du modèle aux observations satellitaires, analysé en partie précédente (2.2) sur quelques mailles sélectionnées.

2.4 Détermination de la meilleure combinaison de phénologies pour l'Europe

Toujours guidée par l'objectif de mesurer i) l'ajustement de la phénologie simulée par ORCHIDEE-STICS à celle observée par satellite et ii) l'amélioration apportée par la prise en compte des cultures en référence à ORCHIDEE originel, j'analyse d'abord (sous-partie 2.4.1), sur l'Europe, la dépendance des corrélations modèle-données (DVI "toute végétation") vis-à-vis du scénario de répartition des cultures d'hiver et de printemps (SOY, NO, FEW & NAT, définis en partie 2.1.4.2 et exploités en partie 2.2 pour 4 mailles fortement cultivées).

Ensuite, les résultats obtenus en utilisant plusieurs diagnostics (R2 & FMT) appliqués aux différentes séries de données satellitaires (DVI "toute vegetation", DVI "cultures seules" & LAI GIMMS) sont comparés (2.4.2).

Ces diagnostics sont finalement utilisés pour déterminer la configuration d'ORCHIDEE-STICS qui apporte la meilleure amélioration de la phénologie simulée pour la végétation agricole Européenne. Ils permettent de proposer une "inversion" de la carte de végétation agricole (2.4.3).

2.4.1 Distribution spatiale des corrélations avec les observations

Les premières analyses des cycles saisonniers foliaires simulés et observés (DVI "toute végétation"), effectuées sur les mailles fortement cultivées sélectionnées (Fig. 2.10), ont montré que la phénologie des cultures a été améliorée par leur prise en compte via le couplage ORCHIDEE-STICS. En étendant les calculs de corrélation à l'échelle de l'Europe, nous obtenons les cartes présentées en figure 2.17, en fonction des scénarios d'agrégation des LAI simulés. Les corrélations considérées ici sont celles calculées sur les séries entières 1982-1999. Leurs valeurs renseignent sur l'accord des cycles saisonniers moyens des anomalies journalières sans les distinguer.

• La simulation de référence NoCROP donne, en moyenne sur les surfaces majoritairement agricoles d'Europe, une corrélation faible ($R^2 = 0.24$, Fig. 2.17a.). Le Sud-Ouest de la Péninsule Ibérique et les Balkans sont les zones les mieux corrélées aux observations avec des valeurs atteignant localement 0.70, tandis qu'en Angleterre et dans plusieurs régions comme le centre de l'Espagne, et le Nord de l'Allemagne et de la Pologne, la corrélation ne dépasse pas 0.1. Dans les Balkans, les minima et maxima du LAI simulé sont en effet bien phasés avec ceux du DVI satellitaire. Le cycle saisonnier des herbacées pseudo-agricoles de la version ORCHIDEE Standard a, dans cette région restreinte, une forme régulière et bien arrondie comme dans le DVI (non illustré). Partout ailleurs en revanche, les herbacées pseudo-agricoles d'ORCHIDEE ont un cycle très irrégulier (Fig. 2.10), laissant ainsi une grande marge d'amélioration.

• La simulation CROP réalisée avec le scénario SOY n'apporte en moyenne sur l'Europe pas d'amélioration par rapport à NoCROP, puisque la corrélation avec les données diminue d'un point²¹ (-0.01, Fig. 2.17c., $R^2 = 0.23$, Fig. 2.17b.). Cependant la distribution spatiale de la corrélation est différente. Les zones les mieux ajustées aux observations sont l'Aquitaine et la Plaine du Pô ($0.50 < R^2 < 0.60$). Sur ces zones, la prise en compte dans le modèle des cultures de printemps entraîne donc une amélioration considérable des simulations du cycle foliaire. Sur la figure 2.12, on pouvait déjà observer que la maille d'Aquitaine était celle pour laquelle le scénario SOY permettait la corrélation la plus grande, avec chacun des deux jeux de données (LAI GIMMS et DVI LSCE), en comparaison aux autres mailles sélectionnées. Ce résultat est le signe que les cultures de printemps sont importantes dans ces régions pour une bonne représentation des surfaces cultivées dans le modèle. L'hypothèse que la carte de végétation utilisée dans le modèle prescrit trop de cultures de printemps n'est pas vérifiée dans ce cas, comme cela a déjà été évoqué au cours de l'analyse de la figure 2.10. En effet c'est en Aquitaine et dans la Plaine du

²¹On appelle "point" le nombre de centièmes dont une corrélation (comprise entre 0 et 1) est augmentée ou diminuée en absolu, pour éviter la confusion avec les augmentations ou diminutions relatives à sa valeur initiale, usuellement exprimées en %.



FIG. 2.17 – Corrélations calculées entre le DVI satellitaire (LSCE, "toute végétation") et les LAI simulés sur la période 1982-1999 a. dans l'expérience NoCROP et b. pour les scénarios SOY, NO FEW et NAT de l'expérience CROP. c. Différences entre les corrélations obtenues pour chaque scénario de l'expérience CROP et pour la simulation NoCROP (=niveau d'amélioration). Les surfaces non majoritairement agricoles (<50% de cultures) d'après le modèle sont masquées.



FIG. 2.18 - Répartition des surfaces de culture à l'échelle sub-nationale pour a. le maïs français,
b. le blé d'hiver d'Outre-Manche, c. le maïs et d. le blé d'hiver italiens, d'après les données USDA [US Department of Agriculture World Agricultural Outlook Board Joint Agricultural Weather Facility, 2007].



FIG. 2.19 – Fractions de la surface des mailles occupées par **a**. le blé et le **b**. maïs d'après les données EUROSTAT à l'échelle des NUTS2, traitées ici pour 5 pays, en collaboration avec le PIK, sur la base des données SIG créées par Till Scherzel.

Pô que se concentre la plus grande partie de la surface de production de maïs française (21%, Fig. 2.18a.) et Italienne (18-24%, Fig. 2.18c.) [US Department of Agriculture World Agricultural Outlook Board Joint Agricultural Weather Facility, 2007]. Ceci se traduit par des fractions de l'ordre de 0.15 cultivées en maïs dans les mailles de la Plaine du Pô et un peu moins dans celles d'Aquitaine d'après les données EUROSTAT à l'échelle des NUTS2²² (Fig. 2.19b.) [?]. Les Balkans produisent également beaucoup de maïs, mais la corrélation, bien que bonne ($R^2 > 0.40$, Fig. 2.17b.), n'est pas supérieure à celle obtenue avec la simulation NoCROP. Au contraire, la très bonne corrélation obtenue avec la simulation NoCROP fait que la simulation CROP entraîne même une dégradation, du fait des deux pics (Mai et Août) trop marqués. Cette dégradation de la corrélation (ainsi que dans le Sud-Ouest de la Plaine du Pô. Dans le reste de l'Europe, aucun changement significatif de qualité de la simulation n'est notable (Fig. 2.17c.).

Le deuxième scénario de la simulation CROP, NO, sans cultures en C3 de printemps, apporte • en moyenne sur l'Europe une amélioration de quinze points (+0.15, $R^2 = 0.39$, Fig. 2.17b.); et ce malgré la légère détérioration de la corrélation sur les Balkans et les deux autres zones à forte occupation par cultures de printemps (Aquitaine et Plaîne du Pô) (Fig. 2.17c.). Ce scénario, extrême dans la mesure où toutes les cultures de printemps en C3 sont remplacées par des cultures d'hiver, révèle les zones où ces dernières avaient été probablement sous-estimées dans la carte de végétation initiale. En Angleterre par exemple, ainsi qu'en Espagne et dans le Sud de l'Italie, la corrélation modèle-données atteint localement 0.70. D'après les données USDA [US Department of Agriculture World Agricultural Outlook Board Joint Agricultural Weather Facility, 2007], les provinces du Sud de l'Angleterre et de l'Italie concentrent autour de $\approx 20\%$ de la culture de blé (de type "hiver") d'Outre-Manche (Fig. 2.18b.) et italienne (Fig. 2.18d.). Ceci se traduit par des fractions de l'ordre de 0.20 cultivées en blé d'hiver dans les mailles Sud de l'Italie d'après les données EUROSTAT (Fig. 2.19a.) [?]. Dans ces données, le Nord de la France ressort avec des fractions atteignant jusqu'à 0.25. Le Nord de la France et de l'Allemagne sont effectivement des zones où le scénario NO apporte une amélioration, bien que moins remarquable que pour l'Angleterre et l'Espagne, à la corrélation avec le DVI.

• Avec le troisième scénario, FEW, intermédiaire entre les précédents SOY et NO, la corrélation modèle-données est encore améliorée en moyenne sur l'Europe. Elle atteint 0.43 (Fig. 2.17b.)

 $^{^{22}}$ Nomenclature commune des Unités Territoriales Statistiques, niveau 2 : 800 000 habitants minimum et 3 millions maximum; En France, les NUTS2 correspondent aux régions administratives, http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/g24218.htm

grâce à cette amélioration de dix-neuf points (± 0.19 , Fig. 2.17c.) par rapport à la simulation NoCROP. C'est surtout la province de Castilla-la-Mancha qui fait la différence avec le scénario précédent NO : quasiment toutes les mailles qui la composent atteignent un niveau de corrélation de 0.70, soit une amélioration autour de soixante points (± 0.60). Cette région regroupe aussi bien des cultures d'hiver (blé, orge) que de printemps (tournesol); elle concentre d'après les odnnées USDA [US Department of Agriculture World Agricultural Outlook Board Joint Agricultural Weather Facility, 2007] 27% des surfaces de production de tournesol en Espagne.

• Le dernier scénario de la simulation CROP, NAT, apporte une amélioration similaire au précédent FEW (+0.20 en moyenne sur l'Europe, Fig. 2.17c.). C'est cette fois le Nord-Est de la fenêtre européenne étudiée qui bénéficie de la plus grande amélioration : République Tchèque, Bavière et Nord de l'Autriche ($0.60 < R^2 < 0.80$, Fig. 2.17b.). Ceci pourrait s'expliquer par l'hypothèse que ce sont des zones où le sol n'est pas nu en hiver. Ce scénario est celui qui permet de limiter la détérioration de la corrélation dans les Balkans et le Sud de l'Espagne ; cela signifie le LAI qu'il simule se rapproche de celui de la simulation NoCROP dans ces zones. Par construction ce scénario inclut en effet des herbacées naturelles à cycle plus long et d'amplitude maximale en été, qui, combiné à la phénologie des cultures d'hiver, correspond bien à la phase du DVI. Le satellite observe en effet des pics peu abrupts, un signal plutôt arrondi avec un maximum en juin et une décroissance lente jusqu'à novembre (non illustré). La surface occupée par les cultures de printemps n'est donc pas sur-estimée dans ces régions. C'est plutôt leur phénologie qui est particulièrement mal représentée par le soja, à cycle très court et dans la réalité pas du tout cultivé au Nord de l'Europe.

Sur quasiment toute la fenêtre européenne considérée (exception faite des zones à faible marge d'amélioration que sont le Sud-Ouest de la Péninsule Ibérique et les Balkans) la prise en compte des cultures dans ORCHIDEE via STICS génère une amélioration importante (doublement) de la corrélation avec les données observées par satellite (ici les DVI "toute végétation" du LSCE). Les différents scénarios, complémentaires dans leur combinaison des phénologies de type "hiver" et "printemps", apportent des améliorations dans des zones bien précises. Celles-ci ont pu être interprétées grâce à la relative fiabilité du signal satellitaire mesuré et traité [Maignan *et al.*, 2008] et à des sources complémentaires d'information sur les surfaces cultivées européennes. Afin d'avoir une confiance encore plus grande en ce résultat et le compléter, plusieurs diagnostics faisant intervenir les autres séries de données satellitaires ont été comparés.

2.4.2 Discussion sur le choix du diagnostic

Par simplicité, cette discussion se base sur le scénario FEW de la simulation CROP et non sur les quatre. La qualité du LAI simulé recombiné via ce scénario est supposée bonne (meilleure sur l'Europe qu'avec SOY ou NO) et à la fois mieux maîtrisée qu'avec le schério NAT faisant intervenir les herbacées naturelles.

2.4.2.1 Corrélations en mode "toute végétation" ou en mode "cultures seules"

La méthodologie d'extraction du DVI "cultures seules" a été présentée en partie ??. La figure 2.20a.²³ montre l'amélioration de la corrélation du LAI simulé au DVI "cultures seules", entre l'expérience NoCROP ($R^2 = 0.14$, LAI agrégé sur les 2 PFT pseudo-agricoles d'ORCHIDEE) et le scénario FEW de l'expérience CROP ($R^2 = 0.42$, LAI agrégé sur les 3 PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS). Cette amélioration (R^2 CROP - R^2 NoCROP) est en moyenne de vingthuit points sur l'Europe (+0.28, Fig. 2.20a.). L'amélioration est assez homogène sur toute la fenêtre.; elle n'est en effet plus "proportionnelle" (elle l'est en revanche dans la comparaison des corrélations en mode "toute végétation") à la fraction de surface occupée par les cultures dans

 $^{^{23}}$ Cette figure est l'homologue de la figure 2.17c. pour le scénario FEW, la différence réside dans le jeu de DVI utilisé pour le calcul de R^2 .



FIG. 2.20 – **a.** Amélioration (couleur rouge) de la corrélation entre modèle (scénario FEW) et données estimée au moyen du DVI "cultures seules" filtré au seuil de 75% selon la carte PELCOM. **b.** Dégradation (couleur bleue) de la corrélation entre la simulation initiale NoCROP et les données lorsqu'on passe du DVI "toute végétation" au DVI "cultures seules" (filtré selon PELCOM).

le modèle et dans la réalité vue par satellite, puisque celles-ci sont seules à contribuer au signal désagrégé. L'amélioration de la corrélation en mode "cultures seules" est de neuf points supérieure (+0.09 en moyenne) à celle de +0.19 calculée en mode "toute végétation". Cette amélioration supplémentaire est d'autant plus importante que la contribution de la végétation naturelle d'une maille au signal "toute végétation" (DVI observé et LAI simulés) est importante et donc la part des cultures extraites faible.

Si l'amélioration (R^2 CROP*vs*.DVI - R^2 NoCROP*vs*.DVI) est plus importante une fois les signaux épurés, c'est parce que la phénologie de la végétation écartée ²⁴ tend, lorsqu'elle est agrégée avec la végétation cultivée, soit à i) baisser le premier terme (R^2 CROP*vs*.DVI), soit à ii) augmenter le deuxième terme (R^2 NoCROP*vs*.DVI) de la différence. On constate d'après la figure 2.20b. que l'amélioration supplémentaire de +0.09 en mode "cultures seules" est entièrement dûe à une dégradation généralisée sur l'Europe (-0.10 en moyenne) de la corrélation entre le DVI et la simulation NoCROP plutôt qu'à une amélioration de celle obtenue avec la simulation CROP. C'est donc l'hypothèse ii) qui est vérifiée. L'absence de la phénologie de la végétation écartée pénalise la simulation NoCROP dans le calcul de la corrélation en mode "cultures seules". Sa présence en mode "toute végétation" masque partiellement le mauvais accord du LAI des PFT pseudo-agricoles avec le DVI "cultures seules".

En moyenne la corrélation du LAI des PFT agricoles de la simulation CROP au DVI n'est pas changée en mode "cultures seules" (-0.01) mais ceci est dû à une compensation entre une légère amélioration sur le Nord et l'Est de l'Europe et une légère dégradation sur l'Espagne (non illustré). Rappelons que l'incertitude dans les données satellitaires en général et en particulier l'extraction d'un DVI "cultures seules" semble plus importante sur l'Espagne que sur le reste de la fenêtre européenne étudiée au vu entre autres du désaccord, prononcé sur cette région, entre les deux cartes d'occupation du sol testées. Du côté du modèle, la fraction agricole totale dans la carte de végétation reste incertaine, liée aux hypothèses émises lors de sa génération [Comm pers. Viovy]. Les différents tests de sensibilité (SOT, NO, FEW & NAT) ne peuvent que suggérer

 $^{^{24} \}it i.e.$ les PFT naturels du côté du LAI simulé et surfaces naturelles à plus de 25% (agricoles à moins de 75%) du côté du DVI

à terme une nouvelle répartition des cultures d'hiver et de printemps à l'intérieur de la fraction agricole totale.

Les résultats présentés en figure 2.20 renforcent les conclusions précédentes :

- la phénologie des régions cultivées de l'Europe nécessite un meilleur traitement dans OR-CHIDEE, et
- la prise en compte des cultures via STICS permet de tripler le coefficient de corrélation du LAI simulé pour l'ensemble des 3 PFT agricoles au DVI attribué aux surface cultivées.

2.4.2.2 Diagnostic R^2 ou FMT

Dans l'article Smith *et al.* [soumis] (partie II.A), c'est un diagnostic de type Figure of Merit (FM) qui a été utilisé pour quantifier à l'échelle de l'Europe l'amélioration de la simulation du cycle saisonnier foliaire, par comparaison au LAI dérivé des observations satellitaire. Dans ce chapitre, on a opté pour la corrélation : ce coefficient permet en effet de comparer des variables de nature différente comme le LAI simulé et le DVI, en s'intéressant à leur phasage plus qu'à leur amplitude. On compare ici la corrélation et la FM obtenues entre le LAI simulé et le LAI satellitaire (GIMMS), en utilisant toute la série temporelle 1982-1999, hiver inclus. Rappelons que l'hiver avait été exclu des calculs de FM dans l'article Smith *et al.* [soumis] à cause du bruit dans le LAI dérivé des observations (GIMMS). On conserve ici les données hivernales par souci d'homogénéité avec les calculs de corrélation effectués avec les DVI, non problématiques en hiver.

La figure 2.21a. (gauche) révèle, pour la simulation NoCROP évaluée avec la corrélation, une structure spatiale similaire à celle obtenue en section 2.4.1 avec le DVI "toute végétation" (Fig. 2.17a.). Les valeurs trouvées pour les zones proches des côtes de la Manche, la Mer du Nord et la Mer Baltique sont faibles et abaissent la corrélation moyenne européenne à 0.21 (contre 0.24 avec le DVI "toute végétation"). La simulation CROP (scénario FEW) apporte une amélioration de dix-huit points en moyenne sur l'Europe (+0.18, Fig. 2.21c. (gauche)) en amenant la corrélation à 0.39 (Fig. 2.21b. (gauche)). Cette amélioration est du même ordre que celle obtenue avec le DVI (Fig. 2.17c.) pour le même scénario.

Une amélioration est aussi détectée avec la Figure of Merit (+0.14, Fig. 2.21c. (droite)) mais ne concerne pas exactement les mêmes zones. La corrélation est améliorée sur l'ensemble de la fenêtre européenne, sauf là où elle était déjà correcte dans la simulation initiale NoCROP et sur le quart Nord-Ouest de la France. En Bretagne, on constate que le signal satellitaire est très plat : le LAI GIMMS est compris entre 2 l'hiver et 2.5 l'été (non illustré) et ne présente donc quasiment pas de saisonnalité. Malgré cela on détecte un pic hivernal, qui diminue la corrélation entre la simulation CROP et les données. La simulation NoCROP produit parfois un pic hivernal (ou à défaut d'un pic marqué, un niveau de LAI restant élévé en hiver), ce qui peut expliquer son avantage sur la simulation CROP dans la comparaison avec le LAI GIMMS. Cet avantage est très visible sur la figure 2.21a. (droite); la très grande similarité d'amplitude entre le LAI simulé dans l'expérience NoCROP et le LAI GIMMS en Bretagne (FM>0.70) est dominante sur le meilleur phasage du pic de Mai dans l'expérience CROP (FM<0.60, Fig. 2.21b. (droite)). En ce qui concerne la Beauce (voir figure 1c. de l'article Smith et al. [soumis]), l'amélioration du phasage du pic de Mai est dominante sur les problèmes de phase hivernale dans le calcul de la FM 2.21b. (droite) mais elle joue à peine dans celui de la corrélation 2.21b. (gauche). En Espagne, le LAI GIMMS a un cycle en apparence assez plat, avec des valeurs faibles, autour de 0.5 (Fig. 2.3e.). La FM, plutôt mauvaise car les cycles simulés ont une plus grande amplitude, n'est ainsi que peu modifiée entre les deux simulations NoCROP et CROP (Fig. 2.21c. (droite)). En revanche, la structure en double-pic du cycle saisonnier simulé dans l'expérience CROP (FEW) apparaît comme une amélioration d'après la corrélation (Fig. 2.21c. (gauche)), sachant que le LAI GIMMS, même faible, est maximal en Mai.



FIG. 2.21 – Corrélations (\mathbb{R}^2 , colonne de gauche) calculées entre le LAI satellitaire (GIMMS) et les LAI simulés sur la période 1982-1999 **a.** dans l'expérience NoCROP et **b.** pour le scénario FEW de l'expérience CROP. **c.** Différences entre les corrélations obtenues pour le scénario FEW de l'expérience CROP et pour la simulation NoCROP, correspondant à l'amélioration réalisée. Idem pour la Figure of Merit (FM, colonne de droite).



FIG. 2.22 – Différence entre l'amélioration de la corrélation (R^2 CROP - R^2 NoCROP, pour le scénario FEW) entre modèle et données estimée via le jeu de données DVI (LSCE, "toute végétation") et celle estimée via le jeu de données LAI (GIMMS). La couleur rouge indique les zones où l'amélioration estimée via le DVI est la plus importante; inversement, la couleur bleue celle où l'amélioration estimée via le LAI GIMMS est plus importante

Bien que tributaires de la fiabilité des observations satellitaires, les deux diagnostics, R^2 et FM, s'accordent sur une amélioration du réalisme du cycle saisonnier foliaire simulé par ORCHIDEE-STICS. Cette amélioration est particulièrement importante dans le Nord-Est de la fenêtre européenne étudiée, où les données sont considérées comme moins incertaines suite aux études préliminaires menées dans ce chapitre (partie 2.1.3).

2.4.2.3 Corrélations aux DVI journaliers ou corrélations aux LAI mensuels (GIMMS)

Le fait que l'amélioration de la corrélation modèle-données soit importante dans le Nord-Est de la fenêtre européenne, telle qu'estimée à partir des LAI (GIMMS), transparait bien sur la figure 2.22. Cette figure montre la différence entre l'amélioration (LAI NoCROP \rightarrow LAI CROP(FEW)) mesurée par corrélation avec le DVI ("toute végétation") et celle mesurée avec le LAI GIMMS. En moyenne sur l'Europe, l'amélioration estimée avec le DVI est d'un point supérieure à celle estimée avec le LAI GIMMS. Cependant cette amélioration est inférieure de dix points si l'on calcule la moyenne sur la moitié Est de la fenêtre (longitude de 5°E à 20°E : Allemagne, Pologne, République tchèque, Italie, Balkans). En effet, l'amélioration diagnostiquée avec le DVI est réalisée plutôt sur la moitié Ouest, où elle est supérieure de quinze points à celle diagnostiquée avec le LAI GIMMS (longitude de 10°O à 5°E : Grande-Bretagne, France, Belgique, Espagne). Cette structure est compréhensible au vu des figures précédentes et vient surtout des différences de corrélations entre la simulation CROP et les deux jeux de données : la corrélation calculée avec le DVI est relativement homogène (Fig. 2.17b. (FEW)) et celle calculée avec le LAI montre plutôt un dipôle Est-Ouest (Fig. 2.21b. (gauche)).

2.4.3 Pistes pour l'amélioration de la répartition et de la phénologie des cultures en Europe dans le modèle

L'analyse de l'effet des hypothèses sur la phénologie des cultures en C3 de printemps²⁵ et des scénarios de répartition des cultures en C3 entre le type" hiver" et le type "printemps"²⁶ sur la structure spatiale des corrélations avec les observations a révélé une complémentarité de ces

²⁵SOY : cycle court du soja, NAT : cycle long des herbacées naturelles

 $^{^{26}\}mathrm{NO}$: pas de cultures en C3 de printemps, FEW : moitié moins de soja que dans SOY



FIG. 2.23 – Meilleure mesure de l'accord modèle-données parmi les 4 scenarios CROP et la simulation NoCROP (\mathbb{R}^2 ou FM, colonne de gauche), meilleur scénario associé (1 rouge SOY, 2 violet NO, 3 orange FEW et 4 jaune NAT, colonne du milieu) et meilleure amélioration du modèle par rapport à NoCROP (différence de \mathbb{R}^2 ou de FM, colonne de droite) obtenus selon les jeux de données et les diagnostics utilisés **a.** la FM calculée avec le LAI GIMMS, **b.** le \mathbb{R}^2 calculé avec le LAI GIMMS, **c.** avec le DVI LSCE "toute végétation" et **d.** avec le DVI LSCE "cultures seules" filtré via la carte de végétation PELCOM.



FIG. 2.24 – Amélioration de la corrélation (R^2) du modèle avec les données LAI GIMMS, DVI "toute végétation" et DVI "cultures seules" (filtre PELCOM) apportée par la prise en compte des cultures (CROP - NoCROP) selon les quatre scénarios SOY, NO, FEW, NAT et leur combinaison optimale surnommée BEST, en moyenne sur l'Europe (mailles sur lesquels les cultures occupent plus de 50% de la surface d'après la carte de végétation du modèle).

scénarios en Europe. On peut ainsi combiner ces scénarios pour évaluer sur l'Europe la meilleure corrélation accessible par ORCHIDEE-STICS et en conséquence la meilleure amélioration par rapport à la version initiale du modèle sans agriculture.

2.4.3.1 Caractéristiques du meilleur scénario

En chaque point, le scénario permettant la meilleure corrélation avec les observations a été retenu. Sur l'Europe, le nouveau scénario ainsi combiné est surnommé "BEST". La figure 2.23 présente les cartes de meilleure corrélation, meilleur scénario et meilleure amélioration obtenues avec les quatres types de diagnostics discutés en section 2.4.2.

On peut constater que la combinaison des scénarios basée sur les valeurs de FM ne conduit pas à une amélioration (+0.16 en moyenne sur l'Europe, Fig. 2.23a. (droite)) beaucoup plus grande que celle apportée par le scénario FEW seul (+0.14, Fig. 2.21c. (droite)). Ceci est dû au fait que ce scénario est le plus souvent retenu comme le meilleur (Fig. 2.23a. (milieu)) et que les différents scénarios donnent une structure spatiale de la FM et une moyenne européenne semblables (non illustré). La carte du meilleur scénario est très différente de celles obtenues avec les trois autres diagnostics (Fig. 2.23b.-d. (milieu)) et les liens avec les données USDA et EU-ROSTAT plus difficiles à établir : ce diagnostic FM est définitivement abandonné dans le cadre de cette étude.

Les trois autres diagnostics basés sur le coefficient R^2 permettent d'estimer la meilleure corrélation (BEST) à ≈ 0.50 (en moyenne sur l'Europe, Fig. 2.23b.-d. (gauche)). Cette meilleure corrélation correspond à plus du double (Fig. 2.23b.-c. (droite)) de la corrélation du LAI GIMMS et du DVI avec le LAI de la simulation initiale NoCROP (Fig. 2.17a. et à plus du triple (Fig. 2.23d. (droite)) en mode "cultures seules". En synthèse de cette étude menée en croisant plusieurs diagnostics et plusieurs scénarios, la figure 2.24 propose un classement des scénarios à l'échelle de l'Europe, basé sur les valeurs moyennes de corrélation modèle-données (ou leur améa. PFT agri. C3 "hiver"

b. PFT agri. "printemps" (C3+C4)



FIG. 2.25 – Nouvelle carte de végétation possible pour ORCHIDEE-STICS, issue de la combinaison des quatre scénarios en maximisant la corrélation des LAI simulés avec les DVI journaliers.

lioration par rapport à la simulation initiale NoCROP, ce qui revient au même). Ce classement SOY<NO<FEW<NAT anticipé dès l'analyse de la figure 2.17 (diagnostic DVI "toute végétation") est confirmé par les deux autres diagnostics (corrélation avec le DVI "cultures seules" et avec le LAI GIMMS). Notons que ce classement peut, par maille, varier selon les diagnostics. Rappelons la figure 2.12, où le classement n'est identique entre les deux diagnostics (corrélation avec le DVI "toute végétation" et avec le LAI GIMMS) que pour la maille d'Espagne-Sud. Cependant, le scénario identifié comme étant le meilleur n'est différent que sur la maille d'Allemagne-Est. Seule la maille d'Aquitaine diagnostiquée via le LAI mensuel (GIMMS) affiche le classement moyen européen.

Sans changer le classement général, le diagnostic utilisant le LAI GIMMS mensuel (Fig. 2.23b. (milieu)) favorise localement le scénario NO sur un plus grand nombre de mailles que les deux diagnostics utilisant les DVI. Ceci peut se comprendre car le deuxième pic est moins bien capturé par le signal à résolution mensuelle, donc celui qui ressort dans les corrélations est le premier, correspondant aux cultures d'hiver. La structure spatiale du meilleur scénario est quasiment identique entre les deux diagnostics utilisant les DVI (Fig. 2.23c.-d. (milieu)). On retrouve comme meilleur scénario :

- le scénario SOY en Aquitaine et dans la Plaine du Pô,
- le scénario NO en Angleterre, dans le Sud de l'Italie dans le Nord de l'Espagne,
- le scénario FEW dans le Sud de l'Espagne,
- le scénario NAT dans le Nord-Est de la fenêtre européenne (pays autour de la République Tchèque) et
- un mélange des trois derniers dans le Nord de la France et de l'Allemagne.

En utilisant cette information, il peut être intéressant de reconstituer une carte de végétation combinant "optimalement" (*i.e.* permettant sur l'Europe l'amélioration BEST des corrélations) les 3 PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS (Fig. 2.25).

2.4.3.2 "Inversion" de la carte de végétation

Cette nouvelle carte correspond mieux à la réalité reportée dans les inventaires du USDA [US Department of Agriculture World Agricultural Outlook Board Joint Agricultural Weather Facility, 2007], les données EUROSTAT et par construction à ce que le satellite observe. La nouvelle carte proposée a été établie à partir du diagnostic DVI "toute végétation". Même s'il est vrai qu'à l'échelle intégrée europénne les résultats obtenus avec les trois diagnostics convergent, on fait plus confiance, dans cette étude, au cycle saisonnier du DVI journalier qu'à celui du LAI mensuel, et par conséquent à la structure spatiale qui résulte des calculs de corrélations avec le DVI. Les résultats obtenus en mode "cultures seules" viennent en appui aux conclusions tirées avec le DVI "toute végétation", signifiant ainsi que les PFT naturels ne changent pas les interprétations en terme de "meilleur scénario". Cependant cette opération de pseudo-optimisation ou "inversion" de la carte de végétation se base sur les hypothèses que la phénologie des PFT individuels est parfaitement simulée par ORCHIDE-STICS et que les données sont parfaites. Ce n'est pas le cas, mais nous considérons que

- l'erreur dans le modèle est pour l'instant supérieure à celle dans le DVI satellitaire et que ce dernier peuvent donc apporter de l'information pour améliorer le modèle, et que
- l'effet de l'importance relative des cultures d'hiver et de printemps se traduisant dans la structure du double pic est dominant sur celui d'un biais du modèle dans la date de semis.

La réponse du cycle saisonnier des cultures en C3 d'hiver et en C4 au forçage climatique a été "validée" sur sites cultivés en blé et en maïs préalablement à cette étude [Gervois *et al.*, 2004].

On peut retenir du classement général mettant le scénario NAT en tête, que le principe de conserver un PFT agricole en C3 à phénologie de type "printemps" au lieu de transformer la répartition initiale binaire des cultures C3/C4 en blé d'hiver/maïs, est une amélioration. En revanche, le fait que le scénario SOY, qui considère pourtant la même répartition des surfaces agricoles que NAT, ne soit pas meilleur que la version initiale sans agriculture, démontre que le soja est à remplacer, dans le modèle, par une autre culture à cycle plus long. Cette culture serait un meilleur représentant du PFT agricole C3 de type "printemps" que le soja, qui par ailleurs, en Europe, n'est cultivé quasiment qu'en Italie, sur $\approx 2.5\%$ de la surface de quelques mailles de la Plaine du Pô [Leff *et al.*, 2004]. Le scénario SOY permet toutefois une bonne amélioration très localement, là où la part du maïs (culture en C4 mais à phénologie similaire à celle du soja) a été sous-estimée. Les scénarios NO et FEW précisent dans quelles zones et dans quelle mesure la part relative des cultures d'hiver peut être augmentée dans la carte de végétation. D'autres scénarios auraient pu être envisagés, mais leur multiplicité justifierait d'entrer dans une démarche plus rigoureuse d'optimisation : une optimisation non seulement

- de la composition des mailles en types de végétation, mais aussi
- de paramètres régionaux du développement des cultures (besoins en chaleur et en froid, qui sont des spécificités variétales) ou
- de leur gestion technique (date de semis).

Ceci n'est pas l'objet de cette étude mais pourrait figurer parmi ses perspectives. Sans passer par une optimisation à partir des données satellitaires, une approche similaire à celle développée par Bondeau et al. [2007] (article en annexe B) serait aussi envisageable : les dates de semis peuvent être, plutôt que prescrites, calculées en fonction d'indices climatiques (températures pour l'Europe, en moyenne sur 20 ans). Dans Bondeau et al. [2007] les dates de semis varient, par exemple pour la catégorie "Temperate cereals", de début Octobre à fin Avril au sein de la fenêtre européenne considérée ici (calculées à partir du forçage climatique CRU). A ces dates de semis variables dans le temps et dans l'espace peuvent être associées les valeurs des paramètres de durée du cycle (besoins en chaleur et en froid) et la valeur de température de base pour le calcul de l'accumulation d'unités de chaleur (degrés-jours). Dans Bondeau Bondeau et al. [2007], cette technique autorise pour un même PFT ("Temperate cereals"), donc un seul jeu de paramètres initiaux, un gradient de phénologies allant du type "hiver" au type "printemps". Les deux types de phénologie des céréales tempérées ne peuvent pas conséquent pas se retrouver ensemble dans la même maille. Cependant, le nombre de PFT étant plus important dans l'approche Bondeau et al. [2007] en vue d'une application du modèle LPJmL à l'échelle globale, la phénologie de type "printemps" est aussi représentée entre autres par les catégories "Temperate roots", "Sunflower", "Soybean" et "Pulses".

2.4.4 Conclusions et perspectives

D'un point de vue purement phénologique (combinaison de types "hiver" et "printemps"), il ne semble pas nécessaire dans un premier temps d'augmenter le nombre de PFT représentant les surfaces agricoles dans ORCHIDEE. La priorité va aux points suivants :

• la préparation et l'utilisation de cartes de végétation (fraction agricole totale et fractions relatives par PFT agricole) sur la base d'informations fines en terme de résolution spatiale et de nombre de catégories d'occupation du sol²⁷. L'agrégation des cycles saisonniers foliaires simulés et la désagrégation des signaux satellitaires y sont très sensibles.

• le test du modèle faisant appel à plusieurs cultures en C3 de type printemps en remplacement du soja et en complément du blé et du maïs. Si le nombre de PFT reste limité à trois, le troisième peut toutefois ne pas être fixe en fonction du point géographique. ORCHIDEE pourrait faire appel par exemple à la betterave de STICS dans les zones du Nord de la fenêtre européenne étudiée et au tournesol dans celles du Sud. L'orge, la pomme de terre et les légumineuses seraient d'autres possibilités. Les paramétrisations pour ces différentes cultures n'étaient pas disponible au commencement de l'approche de couplage ORCHIDEE-STICS. La betterave serait a priori la plus adaptée, avec son cycle long (semée en Mars-Avril, récoltée entre fin Septembre et début Décembre) ; c'est aussi la mieux étudiée dans le cadre des développements du modèle [Comm. pers. Launay, 2006].

• le test de l'accord modèle-données staellitaires et leur validation à tous les deux par des données de terrain/phénologiques au sol sur plusieurs sites, où les dates de semis, rotations et variétés sont connues sur une série d'années. La bonne résolution des DVI ($8km \times 8km$, journalière) peut alors être mieux exploitée. De nouvelles mesures à résolution spatiale modérée (300m à 3km) et à haute résolution temporelle (ex. capteur VEGETATION à bord du satellite SPOT²⁸, MERIS²⁹ à bord d'ENVISAT, MODIS, MSG) seront prochainement exploitables pour caractériser encore plus finement le milieu : son évolution inter-annuelle (assolement), sa gestion (irrigation, techniques culturales...) et la phénologie de la végétation. Si la corrélation entre les cycles saisonniers simulés et les cycles observés est améliorée par rapport aux simulations avec pratiques culturales spatialement et temporellement invariantes, ceci encourage à prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle des pratiques dans les prochaines simulations.

Ces pistes de travail permettront d'affiner la représentation de l'extension, du fonctionnement et de la gestion des écosystèmes cultivés dans ORCHIDEE, dans le but i) d'effectuer des simulations réalistes sur le passé puis ii) d'exploiter des scénarios climatiques et économiques (affectation des surfaces) sur le futur ou dans le cadre d'analyses de sensibilité. Pour autant, elles ne font pas oublier que le résultat concret obtenu avec la combinaison de trois types de cultures dont la phénologie est simulée par STICS est déjà une amélioration considérable par rapport à la version initiale du modèle. Le cycle saisonnier foliaire est plus court et régulier, la phase de croissance maximale apparaît plus tôt dans la saison et un double pic est bien simulé. Le tout est en accord (mesuré selon différents diagnostics) satisfaisant avec les données satellitaires sur l'ensemble de l'Europe. Les données d'origine satellitaire, en particulier le jeu de DVI journaliers produit par Bacour et al. [2006] et validé par Maignan et al. [2008], sont capables de caractériser précisément la phénologie de la végétation. Elles sont un outil précieux d'évaluation des sorties de modèle en terme de cycle saisonnier foliaire et d'aide à la génération de cartes de végétation en complément des inventaires de terrain. L'étude, à l'échelle de l'Europe, de la productivité des cultures (chapitre 3) et de leur contribution au bilan de carbone européen (chapitre 4) peut se faire sur la base de ce cycle saisonnier foliaire simulé par ORCHIDEE-STICS.

 $^{^{27}}$ accessibles depuis peu dans le cadre des projets FP6 Carbo Europe et Nitro
Europe, en collaboration avec le Centre Commun de Recherche
 $({\rm JRC})$

²⁸Systeme Pour l'Observation de la Terre

²⁹MEdium Resolution Imaging Spectrometer

Synthèse sur le cycle saisonnier foliaire des cultures en Europe (Article Smith *et al.* [soumis] et Chapitre 2)

Le cycle saisonnier des LAI simulés par ORCHIDEE-STICS est moins variable d'une année sur l'autre et plus court que celui du LAI simulé par ORCHIDEE seul. Son maximum d'amplitude apparait plus tôt dans la saison et il présente une structure en deux pics, correspondant à la contribution de la croissance des cultures d'hiver puis de printemps au signal agrégé sur l'ensemble des types de végétation. Un gradient Sud-Ouest Nord-Est de la date du maximum foliaire est simulé en réponse au gradient de continentalité et septentrionalité du climat mais n'est pas aussi net dans la simulation non forcée par la phénologie spécifique aux cultures. Le cycle saisonnier d'ORCHIDEE-STICS, ainsi que sa variabilité inter-annuelle et spatiale sont en bon accord sur l'Europe avec les données de télédétection par le satellite NOAA-AVHRR : la "figure of merit in time" (FMT) et la corrélation (calculée sur la série journalière 1982-1999) sont significatives et doublent en moyenne sur l'Europe. L'amélioration par rapport à la simulation d'ORCHIDEE seul est en général proportionnelle à la fraction de surface occupée par l'ensemble des trois PFT agricoles dans chaque maille.

On a constaté que l'importance relative de chacun des pics simulés par ORCHIDEE-STICS n'était pas optimale. Elle devrait par exemple varier entre le bassin parisien et le bassin aquitain, où le maïs occupe une place relativement plus importante dans l'assolement réel. On a supposé que le problème venait plutôt de la carte de végétation considérant des fractions relatives homogènes à l'échelle nationale que d'une mauvaise simulation de la phénologie individuelle des cultures. Quatres tests de sensibilité de l'accord modèle-données à différentes proportions relatives de cultures en C3 d'hiver et de printemps ont été réalisés. Ces tests n'ont pas lieu d'être pour la simulation NoCROP qui ne distingue pas les deux types de phénologie. L'interprétation des causes faisant qu'un de ces quatres scénarios, pas toujours le même selon la zone, donne la meilleure corrélation aux données donne des pistes d'amélioration à la fois de la carte de végétation du modèle et de la phénologie simulée pour le PFT "cultures en C3 de printemps". La combinaison de ces "meilleur scénario" retenus en chaque point permet de recréer par "inversion" une carte qui correspond mieux aux informations du Département d'Agriculture des Etats-Unis (USDA) et donne une corrélation encore meilleure ($R^2 = 0.51$, en moyenne sur l'Europe).

Afin d'affranchir la comparaison modèle-données de la contribution des PFT naturels (dont la phénologie n'est pas parfaitement simulée mais dont l'évaluation ne fait pas l'objet de ce travail), j'ai comparé cette fois les signaux désagrégés, en ne considérant du côté du modèle que le LAI moyenné sur les trois PFT agricoles. Du côté des données, on a procédé à l'extraction d'un signal représentatif des cultures à 75% minimum, en profitant de la bonne résolution spatiale des données satellitaires et de la disponibilité de deux cartes d'occupation du sol à résolution encore plus fine. L'amélioration ainsi quantifiée (triplement de la corrélation moyenne sur l'Europe) représente l'apport de la phénologie agricole : sans que la corrélation du LAI d'ORCHIDEE-STICS aux données soit augmentée, on montre que la corrélation du LAI simulé par ORCHIDEE seul pour les PFT pseudo-agricoles ainsi isolés est très mauvaise ($R^2 = 0.14$). Cette étape de filtration de la contribution des cultures au signal ne change pas les conclusions précédemment énoncées mais au contraire les confirme.

On a montré que, pour la simulation du cycle saisonnier foliaire, la représentation en trois types de cultures, incluant des cultures d'hiver, plutôt qu'en deux types herbacés comme c'était le cas initialement, est une amélioration majeure. Cependant on a vu que ce résultat dépend très fortement de la répartition des cultures d'hiver et de printemps dans la carte de végétation. Les auteurs des données qu'on a utilisées pour élaborer la carte de végétation pour ORCHIDEE-STICS [Leff et al., 2004] envisageaient eux-mêmes de constituer une nouvelle base de données grillées en considérant des fractions relatives par culture régionales et non plus nationales. Au deuxième ordre, la corrélation modèle-données devrait pouvoir être encore améliorée par la prise en compte de la variabilité spatiale et inter-annuelle des pratiques agricoles (dates de semis/récolte). Dans une autre approche intégrant l'agriculture dans un modèle de biosphère (LPJmL, Bondeau et al. [2007, p687-690], Annexe B), l'échelle globale d'application a rendu la prise en compte d'un gradient Nord-Sud de dates de semis prioritaire. Celui-ci, simulé sur la base d'indices climatiques, a été évalué favorablement vis-à-vis des calendriers agricoles du USDA. Le modèle incluant le module agricole simule bien la fraction absorbée du rayonnement incident (faPAR) sur l'Europe ainsi que sur les autres zones agricoles tempérées des Etats-Unis, Canada et Chine, contrairement au modèle LPJ originel, avec représentation simplifiée des cultures. Les zones où la phénologie observée est mal reproduite incluent par exemple le Pakistan, semi-aride. La double culture blériz respectivement en saison sèche et humide n'est pas simulée et la phénologie du riz est mal prise en compte. La comparaison des indices de végétation satellitaires entre eux et des signaux filtrés via les deux cartes d'occupation du sol entre eux, a montré que l'incertitude sur la péninsule ibérique est grande. Les classifications divergent dans cette zone entre les cartes ayant servi aux différents traitements.

Chapitre 3

Productivité moyenne, inter-annuelle et extrême des cultures européennes

Sommaire

3.1	Noti	ion de rendement et étapes de son évaluation
	3.1.1	Préalable à l'évaluation du rendement
		3.1.1.1 Définition la fraction de biomasse récoltée dans le modèle 143
		3.1.1.2 Exploitation des données statistiques
	3.1.2	Evaluation des "rendements" simulés vis-à-vis des statistiques FAO \ldots 144
		3.1.2.1 Ecarts modèle-données pour le blé et de maïs sur 5 pays 144
		Influence du HI et de la définition des PFT
		Influence des surfaces
		3.1.2.2 Répartition des surfaces agricoles europénnes
	3.1.3	Extension à l'évaluation de la productivité moyenne agricole européenne 150
		3.1.3.1 Rendements européens vus par la FAO
		Différences entre espèces cultivées
		Différences entre zones géographiques
		3.1.3.2 NPP simulée par ORCHIDEE-STICS sur l'Europe 152
		Effet du PFT
		Manque d'effet des pratiques culturales
		3.1.3.3 Incertitudes et discussion
3.2	Rép	onse des cultures aux extrêmes 1976 et 2003 159
	3.2.1	Intensité des anomalies de productivité simulées et observées 159
		3.2.1.1 Intensité de la chute de productivité en 1976 et 2003 159
		$3.2.1.2 \text{Phasage des anomalies interannuelles à l'échelle régionale } \dots 161$
	3.2.2	Caractéristiques des anomalies de forçage climatique en 1976 et 2003 . . 161
		$3.2.2.1$ Distribution spatiale \ldots 161
		3.2.2.2 Développement temporel
	3.2.3	Changements d'efficience d'utilisation de l'eau
		3.2.3.1 Evolution normale et anormale de la NPP et la transpiration . 165
		3.2.3.2 Réduction de l'efficience d'utilisation de l'eau en 1976 et 2003 165
		3.2.3.3 Rôle de l'irrigation
	3.2.4	Changements d'efficience d'assimilation du $CO_2 \dots \dots$
		3.2.4.1 Diminution de l'assimilation photosynthétique
		3.2.4.2 Augmentation relative de la respiration autotrophe 171
		3.2.4.3 Discussion
Svn	thèse	sur la productivité moyenne, inter-annuelle et extrême des

Ce chapitre vient en complément des parties I et II.B de l'article à soumettre à *Global Biogeo*chemical Cycles sur l'évaluation d'ORCHIDEE-STICS à diverses échelles de temps et d'espace.

On a étudié sur 5 pays, le rendement moyen simulé par ORCHIDEE-STICS, sa variabilité inter-annuelle sur les trois dernières décennies (amplitude et phasage) et l'intensité de la chute de productivité en réponse à deux évènements extrêmes.

La partie 3.1 revient sur la notion de rendement dans ORCHIDEE-STICS (sous-partie 3.2.1) et sur les étapes de son évaluation. On passe progressivement d'une analyse de la productivité moyenne de 2 types de cultures sur 5 pays (sous-partie 3.2.2) à l'ensemble de la surface agricole sur l'Europe entière (sous-partie 3.2.3).

La partie 3.2 approfondit l'analyse de la chute de productivité observée et simulée pour les années 1976 et 2003 et compare la réponse différentielle du blé et du maïs à ces deux anomalies climatiques dans les simulations. On utilise ORCHIDEE-STICS comme un outil de diagnostic des processus ayant conduit à cette chute de productivité.
3.1 Notion de rendement et étapes de son évaluation

3.1.1 Préalable à l'évaluation du rendement

3.1.1.1 Définition la fraction de biomasse récoltée dans le modèle

Un modèle comme ORCHIDEE n'est pas capable de simuler directement un rendement (poids de matière fraîche d'organes récoltés par unité de surface) s'il ne dispose pas d'un schéma adéquat d'allocation des photosynthétats au sein de la plante. En effet, le rendement est une notion agronomique à laquelle ne correspondent pas vraiment les compartiments "fruits" ou "réserves d'hydrates de carbone" d'ORCHIDEE. Les "fruits" regroupent les tissus reproducteurs annuels des arbres et des herbacées tandis que les réserves tamponnent les variations saisonnières de productivité. Au moment du débourrement, la mise en place rapide des feuilles vide les réserves représentant les bourgeons (ou les pieds pérennes pour les herbacées). Ce compartiment "réserves" se remplit lorsque la plante en cours de développement n'a pas besoin de toute la biomasse nouvellement produite. L'export des réserves et des fruits des herbacées agricoles d'ORCHIDEE-STICS pourrait constituer une forme de rendement (en termes de proportion de la plante), mais la phénologie de ces compartiments (entre autres 10% d'allocation vers les fruits tout au long de la saison de croissance) ne correspond pas à celle des organes récoltés sur une culture. Dans un modèle agronomique comme STICS les organes récoltés ne sont d'ailleurs pas forcément des fruits; leur développement est contrôlé différemment. Pour la betterave par exemple, c'est la racine riche en eau et en sucres qui est récoltée.

Dans la configuration "couplée" ORCHIDEE-STICS, STICS transmet à ORCHIDEE pour chaque culture le LAI, sur la base duquel est calculée la NPP via la formulation de la photosynthèse décrite au chapitre 1. STICS de son côté calcule la biomasse aérienne à partir du même LAI, ainsi que le rendement, lié à la biomasse aérienne par l'Indice de Récolte HI (Harvest Index). On a décidé de ne pas utiliser le rendement de STICS directement, afin de rester cohérent avec la productivité et le bilan d'eau de la simulation NoCROP en configuration standard d'ORCHIDEE.

Une première possibilité pour déduire un rendement de la NPP d'ORCHIDEE-STICS cumulée sur la saison de croissance (biomasse totale) consiste à appliquer les coefficients proposés dans la littérature. Goudriaan et al. [2001] indiquent pour le blé un HI de 0.42 et pour le maïs de 0.45 (fraction de grains dans la biomasse aérienne sèche). On ignore dans le HI la partie de la biomasse aérienne qui peut être récoltée en complément des grains pour un autre usage (paille pour la litière des animaux par exemple). Pour faire le lien entre la biomasse totale et la biomasse aérienne, on a utilisé le ratio de 0.85 (soit 15% de racines dans la biomasse sèche totale). Goudriaan et al. [2001] proposent en réalité une fraction racinaire de 15% par rapport à la biomasse aérienne (soit 13% de la biomasse totale). Cependant, le croisement avec d'autres études (modèle SWAT, dont s'inspire le module agricole du modèle LPJmL développé par Bondeau et al. [2007]) proposant 20% de racines dans la biomasse totale en fin de cycle nous a fait retenir 15%.

 \rightarrow Le rendement déduit de cette façon à partir des simulations ORCHIDEE-STICS diverge de celui calculé par STICS, et ce, de façon plus notable pour le maïs que pour le blé. J'ai constaté que cet écart est attribuable pour le maïs en partie à une divergence déjà prononcée entre biomasses aériennes simulées. Elle est beaucoup plus faible en sortie d'ORCHIDEE-STICS que de STICS seul, à la fois dans la simulation avec et sans irrigation. Dans le cas du blé, les biomasses simulées par STICS et ORCHIDEE-STICS sont similaires. L'autre cause d'écart, pour les deux cultures, est la divergence entre HI calculés par STICS et HI tirés de la littérature. Le gradient latitudinal obtenu dans les HI de STICS, mentionné dans l'article Smith *et al.* [soumis] (partie II.B.1), est dû en partie au climat et en partie au fait que les pratiques agricoles aient été fixées homogènement sur toute l'Europe alors que celles-ci sont en réalité adaptées aux conditions pédo-climatiques locales. Bien que ces valeurs de HI ne soient pas forcément réalistes (de 0.37 à 0.23 pour le blé et de 0.49 à 0.68 pour le maïs irrigué, du Nord au Sud), elles sont cohérentes avec les valeurs des variables transmises de STICS à ORCHIDEE (LAI, indice de satisfaction azotée, irrigation).

• En complément des HI de Goudriaan *et al.* [2001], j'ai testé ces HI de STICS (combinés avec les 15% de racines) pour déduire le rendement de la NPP d'ORCHIDEE-STICS d'une deuxième manière. J'ai opté pour un HI moyen (1972-2003) par culture et par pays pour ne pas influencer la variabilité inter-annuelle de la productivité simulée par ORCHIDEE-STICS, considérée, suite à des expériences préliminaires, comme plus réaliste en termes d'amplitude et de phasage (vis-à-vis des données FAO) que celle de STICS seul.

→ On a pu observer que les rendements moyens (1972-2003) de STICS seul étaient plus proches de ceux obtenus par la FAO¹ pour la même période que ceux d'ORCHIDEE-STICS basés sur le HI de Goudriaan *et al.* [2001] ne le sont. L'opération de post-traitement des NPP simulées par ORCHIDEE-STICS, utilisant les HI de STICS (simulation avec irrigation plutôt que ceux de la littérature, a tendance à réduire les écarts modèle-données pour chacune des deux cultures. Cet écart pourrait être encore réduit pour le maïs, en réglant le problème de la divergence de biomasse, c'est à dire en améliorant (augmentant) la production des cultures en C4 dans le modèle. Ce sont ces HI de STICS qui ont été exploités dans l'article Smith *et al.* [soumis] (partie II.B.1).

3.1.1.2 Exploitation des données statistiques

Afin de pouvoir exploiter les données de la FAO qui ne sont pas disponibles à la résolution du modèle, on a établi des correspondances entre mailles et pays. Celles-ci se basent sur un masque fin de contours de pays et régions dont le format initial a été mis à notre disposition par le PIK. La méthode est détaillée plus précisément en annexe D (puisque ce sont les mêmes développements qui ont servi à établir des correspondances entre régions d'un modèle économique et mailles du modèle).

3.1.2 Evaluation des "rendements" simulés vis-à-vis des statistiques FAO

La NPP en sortie d'ORCHIDEE-STICS est exprimée en gC/m2 (plante entière) alors que les données de rendements de la FAO le sont en tMFg/ha (Matière Fraîche de grains). Outre le HI et la fraction de biomasse racinaire mentionnés précédemment interviennent deux autres coefficients dans la conversion de l'un en l'autre. Il s'agit du taux d'humidité des grains ($\approx 15\%$ pour le blé et $\approx 22\%$ pour le maïs et de la teneur en carbone de la matière sèche végétale ($\approx 48\%$) [Goudriaan et al., 2001]) On considère que la composition en hydrates de carbone (matière sèche) est le complémentaire du taux d'humidité au sein des 100% de matière fraîche de grains, soit 78-85%. J'ai choisi dans un premier temps de transformer les NPP simulées en "rendements" en appliquant les coefficients HI et fraction de biomasse racinaire et de transformer les rendements reportés par la FAO en une grandeur comparable (quantité de carbone dans les grains par unité de surface) en appliquant les coefficients taux d'humidité des grains et contenu en carbone de la biomasse.

3.1.2.1 Ecarts modèle-données pour le blé et de maïs sur 5 pays

Les rendements simulés ne présentant pas de tendance, c'est sur la période entière (1972-2003) qu'ils ont été moyennés (*idem* article Smith *et al.* [soumis], partie II.B.2). Les rendements de la

¹Food and Agriculture Organization of the United Nations



FIG. 3.1 – Ecarts relatifs [(Modèle - FAO)/ FAO] entre données FAO (2000) et "rendements" moyens simulés pour l'ensemble des cultures en C3 d'hiver et en C4 par pays et en moyenne sur les 5 pays. Les rendements simulés (en gC de grains/ m^2) ont été obtenus en utilisant un Indice de Récolte (HI) générique de la littérature (bas) ou le HI déduit par pays et par culture de la simulation STICSi (haut). Les bâtons de couleur pleine représentent les écarts obtenus à partir de rendements agrégés selon les surfaces des deux PFT correspondants dans la carte de végétation du modèle (cas FEW) et ceux hachurés les rendements agrégés selon les surfaces en blé, orge, colza et maïs données par la FAO. Dans le cas d'un écart relatif positif apparait en bleu l'écart supplémentaire induit par l'irrigation. Dans le cas d'un écart relatif négatif apparait en rouge l'écart supplémentaire induit par le fait de ne pas irriguer. Le pourcentage correspondant à la contribution relative (égale dans le modèle et la FAO) des surfaces cultivées en C3 d'hiver et en C4 d'un pays à la moyenne des 5 pays est affiché sur l'axe des abscisses.

FAO au contraire présentent une importante tendance (+0.15t/ha/an sur les 5 pays² pour les deux cultures, soit un triplement en 45 ans). C'est l'année 2000 qui a été choisie comme représentante de la période récente. Les résultats sont identiques à 1-2% près si l'on considère la moyenne 1999-2001 dans les données de la FAO. Côté modèle, ce que nous appelons blé et maïs correspond aux PFT cultures en C3 d'hiver et cultures en C4, qui utilisent les paramètres de STICS définis pour ces deux espèces. Côté données, la question se pose : quelles cultures considérer dans la comparaison entre simulations et statistiques ? Dans l'article Smith *et al.* [soumis] (partie II.B), nous avons étudié la façon dont se comporte le modèle vis-à-vis des données récoltées pour les deux cultures dont notre approche emprunte les paramètres à STICS. C'est surtout l'étape de spatialisation de la simulation de rendements qui a alors été évaluée. La Figure 3.1 présente ici les écarts relatifs entre rendements moyens simulés et observés pour l'ensemble C3 d'hiver et C4³ par pays et en moyenne sur 5 pays. Le PFT C3 d'hiver étant censé représenter non seulement le blé mais aussi les autres cultures à phénologie similaire, je pense qu'il est important de les intégrer à cette étape.

Influence du HI et de la définition des PFT L'utilisation du HI de STICS (Fig. 3.1, haut) à la place du coefficient générique de Goudriaan *et al.* [2001] (Fig. 3.1, bas) tend à diminuer les rendements simulés des cultures d'hiver et à augmenter ceux du maïs (effet évoqué ci-dessus), surtout en Espagne et Italie. C'est l'effet de diminution qui domine pour chacun des pays dans la moyenne des deux catégories de cultures (plus grande contribution des cultures en C3 d'hiver (89% en moyenne sur les 5 pays) que du maïs (11%) aux surfaces moyennées, d'après le modèle Fig. 3.2a. et b.). Il conduit à un écart relatif moindre de moitié (voire de signe opposé) avec les rendements FAO pour la plupart des pays, sauf dans le cas de l'Allemagne, seul pays où le rendement du blé est sous-estimé par le modèle (Fig. 3.1, haut).

Les rendements observés du blé en 2000 étant plus élevés que les rendements observés moyens présentés dans l'article Smith et al. [soumis] (tendance croissante 1972-2003), la sur-estimation par le modèle constatée dans ces premiers résultats (partie II.B.2) pour le blé en moyenne sur les 5 pays est quasiment annulée tandis que la sous-estimation constatée pour le maïs est exacerbée. Le fait d'inclure le rendement de l'orge et du colza dans le rendement FAO moyen des cultures en C3 d'hiver fait baisser celui-ci de plus d'une demie-tonne par hectare (5,1 t/ha contre 5,7 t/ha pour le blé. Le modèle, en bon accord avec les données pour le blé, à 2% près sur l'ensemble des 5 pays (la sous-estimation en Allemagne étant compensée par la sur-estimation en l'Espagne et l'Italie), sur-estime finalement de +8% en moyenne le rendement des cultures en C3 d'hiver toutes confondues. Ceci peut se comprendre car ORCHIDEE-STICS, ayant hérité des paramètres du blé de STICS, ne tient pas compte de la moindre procuctivité des autres cultures d'hiver. La sous-estimation du rendement des cultures en C4 (réduites au maïs en Europe) est plus importante, (-27% CROPi, -66% CROP) mais concerne une surface plus réduite. Cette sous-estimation n'est pas dûe, comme pour le blé vis-à-vis des cultures en C3 d'hiver, à un léger défaut de réprésentativité du maïs pour l'ensemble du PFT cultures en C4. C'est a priori du côté des paramètres de la photosynthèse (températures optimales, taux de carboxylation et de régénération de l'enzyme Rubisco) qu'il faut chercher l'explication à ce défaut de productivité. Cette non-adaptation du modèle aux conditions méditerranéennes s'explique aussi par le fait que les pratiques agricoles ne sont pas adéquates (calendrier cultural et variétés), or c'est sur ces pays que les paramétrisations génériques s'appliquent le moins. Les céréales d'hiver simulées ne connaissent pas le stress causé par les fortes températures, dit "échaudage", qui peut être à l'origine des rendements observés plus faibles en Espagne et Italie.

²Dans la suite, par souci de consistance avec les résultats présentés dans l'article, on continuera à parler des 5 pays même si seuls les quatre principaux sont illustrés. On n'affiche pas les résultats pour l'Autriche qui ne représente que 3% de la superficie des 5 pays, mais sa contribution est prise en compte dans la moyenne sur les 5 pays

³regroupant les cultures suivantes répertoriées par la FAO : blé, orge, colza et maïs

En moyenne (Fig. 3.1, haut, bâtons de droite), les rendements simulés ne s'écartent des rendements observés que de +1% (CROPi, irriguée) à -7% (CROP) si l'on regarde les résultats à l'échelle de l'ensemble des cultures en C3 d'hiver et en C4 sur les 5 pays. Ce bilan très positif vu sous cet angle ne doit pas faire oublier les compensations d'erreur évoquées. La France reste le pays pour lequel les rendements à la fois des cultures en C3 d'hiver et en C4 sont bien simulés, aux écarts respectifs près de +6% et -11% (CROPi), soit +2% en moyenne (CROPi). Sa surface agricole contributrice à la moyenne des 5 pays concernés par cette évaluation est par ailleurs la plus élevée des 5 pays, à hauteur de 36% (Fig. 3.1, axe des abscisses).

Influence des surfaces Les NPP sont simulées sur la grille du modèle, à résolution ici de 0.5° tandis que les données FAO sont disponibles à l'échelle des pays. L'agrégation des NPP des pixels constituant un pays implique l'utilisation d'une carte de végétation, en l'occurence ici celle correspondant au scénario FEW décrit au chapitre 2, fournissant les fractions de pixel occupées par chaque PFT agricole. L'agrégation de plusieurs pays ou PFT en vue d'une estimation plus intégrée du rendement fait intervenir les parts relatives de chaque PFT dans l'agriculture d'un pays et celles de chaque pays dans un ensemble de pays. Or celles-ci diffèrent entre le modèle et les données. Les écarts en % que nous avons commentés jusqu'ici (Fig. 3.1, bâtons de couleur pleine) étaient ceux obtenus par agrégation suivant la carte de végétation du modèle (Fig. ??).

La pondération des rendements simulés par les surfaces en blé (+ orge et colza) et maïs données par la FAO au lieu des surfaces considérées dans le modèle diminue légèrement les rendements moyens par pays, qu'ils aient été calculés en utilisant le HI de Goudriaan *et al.* [2001] ou celui de STICS. Cette diminution se traduit, le cas échéant, par une réduction des écarts relatifs positifs modèle-données et une augmentation des écarts relatifs négatifs (Fig. 3.1, haut et bas, bâtons hachurés). Elle est dûe au fait que la FAO considère, pour chaque pays, une part de surface en maïs (15% en moyenne sur les 5 pays) supérieure à celle du modèle relativement aux cultures en C3 d'hiver (85%) (Fig. 3.2a. et b.). Or on a vu que le rendement simulé du maïs est sous-estimé. C'est en Italie que l'effet de la pondération par les surfaces données par la FAO est le plus visible (Fig. 3.1, haut et bas), la part du maïs dans l'ensemble des 2 PFT selon la FAO égalant le double de celle déduite de la carte de végétation du modèle (Fig. 3.2a., l'orge et le colza n'y étant pratiquement pas cultivés d'après la FAO. La contribution supérieure du maïs à la moyenne des deux PFT se retrouve aussi dans l'effet légèrement plus important de l'irrigation sur les rendements moyennés d'après les surfaces FAO que sur ceux moyennés d'après la carte de végétation du modèle (Fig. 3.1, haut et bas, hachures bleues).

Ces considérations ne changent pas les conclusions précédentes (estimation satisfaisante par le modèle du rendement moyen d'un ensemble de deux PFT sur 5 pays) mais invitent à se pencher sur les différences entre surfaces agricoles utilisées par le modèle et celles inventoriées par la FAO, en vue de l'élargissement de l'évaluation à l'ensemble des cultures de notre fenêtre européenne.

3.1.2.2 Répartition des surfaces agricoles europénnes

Bien que les contributions (en %) des surfaces cultivées en C3 d'hiver et C4 des pays individuels à la moyenne des 5 pays soient identiques d'après le modèle et la FAO (Fig. 3.1, axe des abscisses), elles sont très différentes en millions d'ha pour deux raisons :

Les surfaces cultivées en C3 d'hiver et en C4 représentent dans le modèle en moyenne sur l'Europe 70% (+/-10% selon les pays) du territoire agricole total. Dans les données de la FAO, ces mêmes cultures n'en représentent que 50% (+/-10% selon les pays) (Fig. 3.2a. et b.). Cet excès dans le modèle provient du fait que les surfaces ont été agrégées suivant le "scénario" de répartition des cultures FEW, décrit au chapitre 2. Or celui-ci, bien que



FIG. 3.2 – Surfaces agricoles par pays **a**. et sur l'Europe **b**. selon la carte de végétation du modèle (cas FEW) et la FAO (2000). Dans le modèle, toute l'agriculture est représentée par les 3 PFTs agricoles caractérisés par les paramètres du blé, du maïs et du soja (couleurs pleines). Dans les données de la FAO, les surfaces produisant d'autres cultures que le blé, le maïs et le soja sont représentées par des couleurs hachurées. Le "reste des C3 d'hiver" comprend l'orge et le colza et le "reste des C3 de printemps" les autres céréales, les oléagineux et les légumineuses. Le "reste de l'agriculture" comprend les racines et tubercules, les plantes sucrières et la moitié des légumes (plein champ). "Autre" comprend l'autre moitié des légumes (serre), les fruits, noix, olives, épices, fibres, fourrages et tabac. Sur les axes des abscisses est affiché le pourcentage que représente le territoire agricole total rapporté à la superficie des pays ou zones de l'Europe (vues par le modèle).

globalement meilleur (sur la base du cycle foliaire agrégé de la végétation confronté aux observations satellites) que le scénario initial SOY (chapitre 2, partie 2.4), tend à favoriser les cultures d'hiver. Le scénario initial SOY, lui, favorisait les cultures de printemps dans les mêmes proportions. Nous avons toutefois conservé le scénario FEW, celui-ci permettant de faire le lien avec l'étude présentée dans le chapitre suivant. On constate par ailleurs qu'il n'y a qu'en Italie que la surface réellement cultivée en soja n'est pas complètement négligeable, i.e. du même ordre de grandeur que la surface couverte par le reste des cultures en C3 d'hiver et de printemps (Fig. 3.2a.).

• Le territoire agricole total lui-même est très différent entre modèle et FAO⁴. Cette différence représente 6% (Allemagne) à 16 % (France) de la superficie des pays (Fig. 3.2a., axe des abscisses) et jusqu'à 20% de la superficie de l'Europe en dehors de ces 5 pays (Fig. 3.2b., axe des abscisses). Cumulée sur l'Europe, cette différence est de l'ordre de 37 millions d'ha (Fig. 3.2b.), soit un peu plus que la superficie de l'Allemagne. D'après le modèle, un peu plus de 40% du territoire est cultivé contre un peu moins de 30% d'après la FAO. Deux biais, liés à l'origine-même de ces informations sur les surfaces semblent s'ajouter pour composer une telle différence.

 \rightarrow D'un côté, la fraction agricole par maille du modèle, (tous 3 PFT confondus), a été obtenue, sur l'Europe, principalement à partir de la base de données CLC2000 évoquée au chapitre 1 (partie 1.3.3). Or CLC2000 définit dans sa nomenclature des postes à caractère "mixte" au sein desquels aucun sous-ensemble homogène détecté par satellite n'occupe plus de 75% de l'unité paysagère. De la végétation non agricole de nature diverse peut ainsi être comptabilisée comme territoire agricole au moment où l'affectation des postes à un PFT doit être décidée, en vue de l'élaboration de la carte de végétation pour ORCHIDEE (Comm. pers. Viovy). Ce biais induit une sur-estimation des surfaces agricoles par rapport à la réalité.

 \rightarrow De l'autre côté, les données que j'ai extraites de la base de données ProdSTAT de la FAO ne tiennent compte que des surface récoltées, dont la production peut être estimée par un poids et une valeur marchande. La jachère (de l'ordre de 10% des surfaces cultivables (référence PAC) et les prairies pâturées n'en font ainsi pas partie (contrairement aux prairies fauchées pour le foin). En outre les surfaces récoltées peuvent être inférieures aux surfaces effectivement semées à cause d'échecs ponctuels dans la conduite des cultures conduisant à leur abandon ou à leur reconversion. L'auto-consommation est en revanche bien prise en compte.

 \rightarrow Finalement, la réalité se trouve entre les deux. Le fait que la différence soit relativement plus importante dans la zone de l'Europe en dehors des 5 pays étudiés plus en détail (Fig. 3.2b.) semble tenir à deux choses. D'un côté, l'agriculture se présente dans ces zones, plus que dans les 5 autres pays, sous des formes mixtes ; ce qui accentue la sur-estimation des surfaces agricoles par le modèle De l'autre, les pâturages y sont relativement plus étendus, or non comptabilisés par la FAO dans la rubrique "Crops Primary", ce qui accentue la sous-estimation. Ceux-ci le sont cependant dans les archives "Land Use", catégorie "permanent pasture". Le fait que les pâturages couvrent une grande surface (jusqu'à 46% de la superficie des les Iles Britanniques⁵ contre 18% en moyenne sur les 5 pays) va de pair avec une faible surface cultivée en fourrages (0% contre 5%, respectivement). Les animaux sont nourris directement au pré. Or les fourrages sont, suivis des fruits, les cultures principales (75%) contribuant à la catégorie baptisée "autre". Les Iles Britanniques comptent pour 20% de la zone Europe en dehors des 5 pays. Cette catégorie "autre" est par conséquent

⁴Ce qu'on appelle ici territoire agricole total correspond à la somme des catégories de productions végétales renseignées dans la base de données ProdSTAT de la FAO sous" Food" et "Non-food commodities". On a regroupé (i) les céréales autres que blé, orge et maïs, (ii) les oléagineux autres que le colza et (iii) les légumineuses dans une catégorie baptisée "reste des cultures C3 de printemps". Les cultures dont les organes récoltés ne sont pas des grains ou des gousses ont été réparties entre deux catégories baptisées "reste de l'agriculture" (tubercules et organes riches en eau) et "autre" (cultures pérennes herbacées et arbustives)

⁵Irlande et Royaume-Uni, la moitié faisant partie de notre fenêtre européenne

faiblement représentée en dehors des 5 pays (18% du territoire agricole total contre 35% en moyenne sur les 5 pays, Fig. 3.2b.). Si l'on ajoutait au territoire agricole total de la FAO les zones classifiées "permanent pasture" on atteindrait alors une surface supérieure à celle du territoire agricole total considéré dans le modèle. Cette surface atteinte serait encore supérieure si c'était au total de surface classifiée "arable land & permanent crops" (archive "Land Use"), qui inclut une catégorie (à laquelle la jachère appartient mais non identifiée dans la rubrique "Crops Primary"), qu'on ajoutait les "permanent pasture". La carte de végétation du modèle exclut en effet du territoire agricole total les "pelouses et pâturages naturels". Parmi les terres enherbées, elle n'inclut que les prairies fauchées et une partie des pâturages. Aux pays-Bas, la production horticole (4000ha, source : CTIFL 2002) compte pour un peu moins de la moitié de cette catégorie de cultures non comptabiliées dans la rubrique "Crops Primary" mais prises en compte dans le modèle.

S'ajoute à cela le fait que le modèle ne considère pas la même superficie pour les pays que ne le fait la FAO. Elle est sur-estimée par le modèle, et ce d'autant plus que les pays ont un périmètre côtier important. Pour l'Autriche, sans connexion avec la mer, modèle et informations géographiques⁶ s'accordent sur une superficie de 8,4 millions d'ha tandis que pour l'Italie, le modèle agrandit le territoire de près de 6 millions d'ha par rapport aux 30 millions d'ha réels. Cette sur-estimation vient de la définition du masque Terre-Mer (à la résolution de 0.5°) visiblement biaisée en faveur des surfaces continentales. Rapporté à la superficie réelle de l'Italie, le territoire agricole représente non plus 27% (Fig. 3.2a., axe des abscisses) mais 32% du pays (ce qui reste légèrement inférieur à la fraction équivalente dans le modèle).

Malgré ces trois considérations, le classement des pays en termes de nombre d'ha cultivés reste le même entre modèle et données, la France dominant en surface agricole absolue et l'Allemagne en surface agricole rapportée à sa superficie (Fig. 3.2a. et b.. Ceci est important lorsqu'on envisage une intégration sur l'ensemble des cultures à l'échelle de l'Europe, étant donnée la variabilité spatiale de la productivité. L'excès de surface agricole dans le modèle par rapport à la réalité peut en revanche devenir ennuyeux pour une agrégation avec la productivité des autres écosystèmes européens en vue de produire une estimation réaliste intégrée du flux de carbone échangé avec l'atmosphère. En effet l'agrégation se ferait au détriment d'autres types de végétation à productivité potentiellement différente, ou en tous cas dont la réponse à la variabilité spatiale et temporelle des facteurs environnementaux peut être différente.

En début de cette section, nous avons évalué la prodution moyenne récente (2000) d'un ensemble de cultures regroupées en 2 PFT sur la zone de 5 pays dont les statistiques de rendements ont été exploitées sur la période 1972-2003 dans l'article Smith *et al.* [soumis] (partie II.B). Comment se comporte le modèle en moyenne sur les 52% de surface restants de la fenêtre européenne qui borne nos simulations et dont nous souhaitons pouvoir tirer une estimation fiable de la productivité ?

3.1.3 Extension à l'évaluation de la productivité moyenne agricole européenne

3.1.3.1 Rendements européens vus par la FAO

On constate que le rendement moyen observé est inférieur, de -1.3 t/ha pour les C3 d'hiver et C4 et de -1.2 t/ha pour les C3 de printemps, en dehors des 5 pays précédemment étudiés, contribuant ainsi à abaisser la moyenne européenne de 6% et 12% pour l'une et l'autre des catégories respectivement (Fig. 3.3). Les cultures en C3 de printemps affichent sur les deux parties

 $^{{}^{6}{\}rm CIA}\ {\rm World}\ {\rm Factbook}: {\rm https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/$

de l'Europe un rendement plus faible (en moyenne 2.9 t/ha) que celui des C3 d'hiver et C4 (en moyenne 5.3 t/ha). Le fait d'inclure les catégories "reste de l'agriculture" et "autre" dans les autres cultures augmente considérablement leur rendement moyen européen, le menant à 14,2 t/ha et 16,1 t/ha (Fig. 3.3). Sa structure spatiale en faveur des 5 pays n'est pas modifiée.

Différences entre espèces cultivées Les grosses différences de rendement entre cultures pour une même zone géographique (Fig. 3.3) sont dues au potentiel propre à chacune de remplir les organes intéressants pour la récolte (on ne considère pas ici que les composés carbonés) et à sa sensibilité aux stress.

Chez la betterave sucrière et la pomme de terre, les organes récoltés ne sont pas les fruits mais les racines et tubercules. Ces organes de stockage, très riches en eau (75-80%) [Goudriaan et al., 2001], permettent à la première de réaliser son cycle sur deux ans et à la deuxième de se reproduire par voie végétative. Le rendement observé étant exprimé en tonnes de matière "fraî-che" (par ha) telle que commercialisée, il est d'autant plus élevé (à NPP égale) que les organes récoltés contiennent de l'eau et que la fraction de biomasse concernée représente une grande part de la plante. Chez la betterave sucrière et la pomme de terre, regroupées dans la catégorie "reste de l'agriculture" la fraction récoltée est de l'ordre de 0.5 (exprimé en fraction de l'azote total qui est stockée dans les organes de récolte, elle est de 0,51 dans l'étude de Schittenhelm [1999]), cette fois définie par le ratio du poids des organes récoltés sur la biomasse totale (et non pas seulement aérienne).

Le concept d'indice de récolte fréquemment appliqué aux céréales (HI compris entre 0.4 et 0.6, de la biomasse aérienne, lorsqu'elle sont cultivées de façon intensive [Hay, 1995] est moins couramment utilisé pour définir le rendement des autres cultures. Le HI du colza est inférieur à celui du blé [Habekotte, 1997] (expliquant en partie le rendement observé des C3 d'hiver plus faible que celui du blé, partie 3.1.2). Pour le soja et le tournesol, le paramètre qui le représente dans le modèle CROPSYST, de même que dans le modèle SWAT dont est inspiré le module d'agriculture de LPJmL [Bondeau *et al.*, 2007], est compris entre 0.25 et 0.35. Le HI des légumineuses est faible ; leur sélection génétique s'est faite en faveur de variétés productives en toute saison [Hay, 1995]. A NPP égale (et fraction de racines égale et taux d'humidité égal), le rendement des cultures regroupées dans la catégorie "reste des C3 de printemps" est donc inférieur à celui des C3 d'hiver et C4. L'information sur la NPP correspondant aux rendements fournis pas la FAO n'est malheureusement pas accessible.

La biomasse aérienne des cultures fourragères est en général récoltée entièrement [Bolinder et al., 1997]. Les légumes et fruits, avec lesquels elles sont regroupées dans la catégorie "autre", ont un rendement plus faible que la pomme de terre et la betterave sucrière. Comme elles sont cultivées sur une plus grande surface, elles contribuent toutefois plus à augmenter le rendement moyenné avec les C3 de printemps (Fig. 3.3). A NPP égale, ce rendement plus faible peut s'expliquer par une moindre teneur en eau, en moyenne, dans les parties récoltées. On considère que ces parties récoltées (assimilées à l'ensemble des parties aériennes) représentent 50% de la biomasse totale, comme la fraction de racines (et comme la fraction récoltée chez les betteraves et pommes de terre en moyenne). La fraction annuelle de NPP allouée aux parties souterraines est effectivement de 50% d'après Bolinder et al. [1997] pour les cultures herbacées pérennes tempérées contre 20% pour les herbacées annuelles canadiennes. Monk [1966] a également montré que le ratio racines :tiges est croissant des herbacées annuelles aux herbacées pérennes puis aux ligneux pérennes.

Différences entre zones géographiques La différence de rendement entre zones géographiques pour une même catégorie de cultures (Fig. 3.3) est liée, elle, aux conditions pédo-

climatiques et pratiques culturales plutôt qu'à des caractéristiques physiologiques de l'espèce cultivée⁷. L'agriculture est moins intensive en moyenne dans la zone de l'Europe en dehors des 5 pays, si l'on en croit la dose de fertilisants (tous types : organiques et minéraux) apportée par ha de surface agricole totale⁸. On considère ici comme surface agricole totale la somme des surfaces classifiées "arable land & permanent crops" et "permanent pasture" dans les archives "Land Use". Les 5 pays ont consommé en moyenne en 2000 115 kq/ha de fertilisants tandis que les pays de la fenêtre européenne en dehors de ces 5 pays en ont consommé 88 kq/ha. Au sein des 5 pays, les apports supérieurs en France et Allemagne sont compensés par ceux inférieurs en Espagne et Italie. Dans la zone en dehors de ces 5 pays, la dose moyenne de fertilisants apportée par ha en 2000 est beaucoup plus faible si l'on extrait l'Irlande, les Pays-Bas (214 t/ha), et la Slovénie de la moyenne. Ces gros consommateurs d'engrais dépassent même la France (140 t/ha). Les plus petits consommateurs sont la Bosnie-Herzégovine, la Slovaquie et le Portugal (20-55 t/ha). On comprend que si les pratiques, incluant la fertilisation, sont moins favorables à l'obtention de forts rendements dans les zones de le fenêtre européenne en dehors des 5 pays, cela passe par une moindre productivité nette combinée à une moindre fraction allouée vers les organes de récolte (à potentiel de rendement $(algebra gal^9)$

Le modèle reproduit-il ces différences de productivité entre cultures et entre zones géographiques, au delà des cultures en C3 d'hiver et en C4 sur les 5 pays précédemment étudiés?

3.1.3.2 NPP simulée par ORCHIDEE-STICS sur l'Europe

La figure 3.4 montre que le modèle présente une plus grande homogénéité de productivité entre PFT et entre zones de l'Europe que ne le fait la FAO (en termes de rendements).

Effet du PFT Sachant que la variable du modèle qu'on décrit ici est la NPP, il est normal que la partie de l'hétérogénéité liée aux coefficients variables permettant la conversion de NPP en rendements ou vice-versa (HI, taux d'humidité du produit récolté, fraction de racines) soit annulée. Le contenu en carbone de la matière sèche a été considéré comme constant et égal à 48%. La différence restante entre NPP des PFT pour une même zone géographique (Fig. 3.4) montre que le soja, représentant les cultures en C3 de printemps, est moins productif (674 gC/m^2 , en moyenne sur l'Europe, simulation CROPi) que l'ensemble des cultures en C3 d'hiver et en C4 (838 gC/m^2). Ceci est d'autant plus vrai que la simulation a été réalisée sans irrigation (réduction de -251 gC/m^2 et -45 gC/m^2 respectivement).

Cette moindre productivité moyenne du PFT vient principalement des paramètres spécifiques au soja, transmis de STICS à ORCHIDEE via le LAI, puisque ses paramètres côté ORCHIDEE sont identiques au PFT cultures en c3 d'hiver pour la photosynthèse. La saison de croissance étant plus courte (date de semis plus tardive que le maïs et critères thermiques différents, vus au chapitre 1), la biomasse que la plante peut accumuler est plus faible (à stress hydrique et azoté égal) [Pattey *et al.*, 2001]. Cela reste vrai malgré le fait que le LAI maximum du soja soit en moyenne supérieur à celui du maïs, à cause de la saturation de l'efficience d'interception du rayonnement pour les forts LAI. Ce résultat de moindre productivité va dans le même sens que ce qu'on a observé pour la catégorie de cultures "C3 de printemps" à partir des données FAO.

⁷On place ici la sélection génétique qui vise entre autres à augmenter l'indice de récolte dans les pratiques culturales et non dans les caractéristiques physiologiques

⁸ on ignore ici le fait qu'une partie de la différence entre apports des différents pays tient aux besoins différents des espèces qui peuvent être cultivées dans des proportions différentes

⁹Le rendement potentiel "en champ" (par opposition à "en conditions expérimentales contrôlées") d'une culture est le rendement qui peut être ateint compte-tenu des conditions pédo-climatiques et des caractéristiques génétiques de la variété choisie, en dehors de tout stress affectant la croissance (hydrique, azoté, biologique, physique...) celui-ci s'atteint au moyen des meilleures pratiques agricoles connues à une certaine date pour un certain milieu



FIG. 3.3 – Rendements agricoles estimés par la FAO (2000) en moyenne sur les 5 pays, en dehors des 5 pays et sur l'Europe, pour les cultures en C3 d'hiver et en C4 (gauche), les autres cultures (milieu) et l'ensemble des cultures (droite). Les hachures verticales (resp. horizontales) indiquent le supplément de rendement obtenu en considérant aussi dans la moyenne les surfaces cultivées en "reste de l'agriculture" (resp. en "autre"). Sur l'axe des abscisses est affiché le pourcentage de contribution en surface au bâton final représentant la moyenne européenne toutes cultures confondues.



FIG. 3.4 – NPP agricoles simulées (1972-2003) en moyenne sur les 5 pays, en dehors des 5 pays et sur l'Europe, pour les cultures en C3 d'hiver et en C4 (gauche), les autres cultures (milieu) et l'ensemble des cultures (droite). La couleur bleue indique le supplément de NPP obtenu par irrigation. Sur l'axe des abscisses est affiché le pourcentage de contribution en surface au bâton final représentant la moyenne européenne toutes cultures confondues.

Les chiffres ne sont cependant pas comparables directement, le moindre HI étant un facteur de réduction supplémentaire du rendement.

L'effet plus important de l'irrigation dans le modèle pour ce PFT C3 de printemps par rapport à l'ensemble des C3 d'hiver et C4 est dû à l'agrégation de ces deux derniers PFT en faveur des C3 d'hiver (part de 89% en moyenne sur l'Europe), sur lesquels l'irrigation n'a pratiquement pas d'effet.

Manque d'effet des pratiques culturales La différence entre NPP moyennes simulées en Europe en dehors de ces 5 pays et sur les 5 pays pour un même PFT est faible, surtout dans le cas CROPi; elle est plus faible que celle entre PFT pour une même zone (-163 CROPi et -369 gC/m^2 CROP, en moyenne sur l'Europe). La NPP simulée en dehors des 5 pays est de -55 à -75 gC/m^2 inférieure pour les C3 d'hiver et les C4 et de +30 à +150 gC/m^2 supérieure pour les C3 de printemps (Fig. 3.4). Ceci contribue respectivement à abaisser la moyenne européenne de -2 (CROPi) à -3% et à l'augmenter de +1 (CROPi) à +13%. Pour l'ensemble des PFT C3 d'hiver et C4, cette constatation va dans le même sens que ce qu'on a pu observer dans les données (moindre productivité en dehors des 5 pays). En revanche, pour les C3 de printemps, la productivité supérieure en dehors de 5 pays ne correspond pas à ce qui est observé dans les rendements.

La faible différence de NPP simulée entre les deux zones géographiques que nous avons définies tient à ce que les pratiques culturales, bien qu'irréalistement paramétrées ici comme identiques partout, permettent de ne pas trop limiter la productivité. Les pratiques effectivement appliquées dans la réalité représentée par les données FAO n'ont pas été précisément prises en compte, or on pense que celles-ci désavantagent sensiblement la zone européenne en dehors des 5 pays. Les dates de semis et les variétés conduisant aux rendements de la FAO sont variables spatialement et d'une année sur l'autre. Il en est de même pour l'irrigation et la fertilisation. Dans les simulations, l'ensemble CROP CROPi permet une fourchette d'estimations extrêmes (en termes d'irrigation) qui devrait idéalement encadrer les données. Côté fertilisation, pour ne pas multiplier les expériences numériques nous avons fixé pour les deux simulations CROP et CROPi un même seuil de satisfaction des besoins en azote au-dessous duquel la fertilisation automatique calculée par STICS se déclenche. Ceci conduit cependant à des doses variables d'engrais azoté apportées par culture par pixel. Dans la simulation sans irrigation (CROP) le stress azoté peut toutefois être plus élevé que dans la simulation CROPi car l'exploitation des nutriments présents est conditionnée par l'humidité du sol, moindre dans ce cas. Le déclenchement plus fréquent de la fertilisation dans cette simulation CROP ne va pas pour autant combler le manque d'azote déclaré.

La plus grande sensibilité des cultures en C3 de printemps à l'irrigation sur les 5 pays (Fig. 3.4) peut être due aux conditions climatiques méditerranéennes de l'Espagne et de l'Italie, non représentées dans l'autre partie de l'Europe. Cette information ne peut pas se retrouver dans les données FAO qui ont agrégé des rendements de surfaces irriguées avec ceux de surfaces non irriguées.

L'utilisation du soja comme représentant des cultures en C3 de printemps dans le modèle montre encore une fois (cf. chapitre 2) qu'il semble mal remplir ce rôle. Sa productivité est supérieure en dehors des 5 pays, contrairement à ce qui est observé dans les données. Cependant, on constate que les valeurs de rendement du soja seul, inclus dans la catégorie de cultures en C3 de printemps (Fig. ??), sont tout à fait représentatives de l'ensemble de la catégorie, bien que contribuant très faiblement à la moyenne. Le problème de la productivité du soja (Fig. 3.4) n'est ainsi peut-être pas lié ici au choix de cette culture mais plutôt à sa réponse aux pratiques culturales inadéquatement paramétrées.



FIG. 3.5 – Comparaison des NPP simulées par ORCHIDEE-STICS aux rendements estimés par la FAO (2000) pour l'ensemble des cultures sur l'Europe (droite) décomposée en 2 termes : les cultures en C3 d'hiver et en C4 sur 5 pays d'un côté (gauche), et ces mêmes cultures en dehors des 5 pays plus les autres cultures européennes de l'autre (milieu). Le rapport entre les échelles des deux axes correspond exactement au facteur de transformation (en moyenne sur les 5 pays) de la NPP cumulée sur l'année (gC/m^2) en rendement (tMF/ha). Ce facteur (utilisé pour la figure 3.1) combine le HI STICSi par culture et par pays avec 15% de racines, 48% de carbone dans la matière sèche et un taux d'humidité des grains de 15% pour le blé et 22% pour le maïs. Sur l'axe des abscisses est affiché le pourcentage de contribution en surface aux bâtons finaux représentant la moyenne européenne toutes cultures confondues.

Malgré les incertitudes sur les valeurs de productivité observées et simulées et sur la conversion d'un rendement en NPP, peut-on considérer que la productivité agricole moyenne est correctement estimée ?

3.1.3.3 Incertitudes et discussion

Les surfaces agricoles non cultivées en C3 d'hiver et C4 ou en dehors des 5 pays, i.e. celles¹⁰ dont la produtivité n'a pas été évaluée en début de chapitre (partie 3.1.2), représentent 52% de la surface agricole européenne considérée dans le modèle (et correspondent à 64% d'après les surfaces FAO). En les regroupant, nous obtenons les deux bâtons du milieu de la figure 3.5. Celui de gauche représentant la NPP simulée et celui de droite le rendement observé. Les deux bâtons de gauche et les deux de droite sont repris des figures 3.3 et 3.4. La confrontation des NPP et des rendements tels quels n'a pas vraiment de sens, les deux ne représentant pas la même grandeur (quantité de carbone vs. quantité de matière fraîche). Le rapport entre les deux échelles des axes d'ordonnées a cependant été choisi égal à 150.15^{11} , soit le facteur de conversion du rendement en NPP pour les C3 d'hiver et C4. On retrouve les +1 et -7% d'écart relatif entre modèle et données de la partie 3.1.2, obtenus pour ces deux PFT respectivement avec et sans irrigation. On voit bien que pour interpréter la qualité de la NPP simulée pour le reste des cultures et de l'Europe, un étape supplémentaire est nécessaire. La relation entre NPP et rendement est très variable selon les catégories de cultures, comme nous l'avons évoqué en partie 3.1.3.2. Si l'on prend les C3 d'hiver et C4 comme référence, on peut anticiper que le fait de tenir compte du

 $^{^{10}}$ Il s'agit des surfaces en C3 de printemps dans les 5 pays et en dehors, ajoutées aux C3 d'hiver et C4 en dehors des 5 pays

 $^{^{11}2200~}gC/m^2$ correspondent à 14,65 tMF/ha, CROPi



FIG. 3.6 – Comparaison des NPP simulées par ORCHIDEE-STICS et estimées à partir des rendements FAO (2000) pour l'ensemble des cultures sur l'Europe (droite) décomposée en 2 termes : les cultures en C3 d'hiver et en C4 sur 5 pays d'un côté (gauche), et ces mêmes cultures en dehors des 5 pays plus les autres cultures européennes de l'autre (milieu). Les coefficients utilisés pour la transformation des rendements FAO en NPP sont présentés dans le tableau 3.1. Les hachures, cette fois diagonales (resp. verticales), indiquent le supplément de NPP obtenu en enlevant de la moyenne les surfaces cultivées en C3 de printemps et "reste agri."). Sur l'axe des abscisses est affiché le pourcentage de contribution en surface aux bâtons finaux représentant la moyenne européenne toutes cultures confondues.

Coefficient	$egin{array}{c} \mathbf{MSr}^{\mathrm{a}}\ (\%) \end{array}$	\mathbf{HI}^{b}	$egin{array}{c} \mathbf{MSa^c} \ (\%) \end{array}$	${f C^{ m d}}\ (\%)$	$\times MSr/HI/MSa \times C \times 100$
Conversion	$tMFr/ha \rightarrow tMSr/ha$	$\rightarrow tMSa/ha$	\rightarrow tMS/ha	$\rightarrow\!10^2 gC/m^2$	${ m tMFr/ha}{ ightarrow}{ m gC/m^2}$
C3 "hiver" et C4	≈ 84	≈ 0.32	85	48	$\times \approx 150$
C3 "printemps"	80	0.25	80	48	$\times 192.00$
"reste agri."	20	0.50	-	48	$\times 19.20$
"autre"	40	1	50	48	$\times 38.40$

TAB. 3.1 – Coefficients de conversion des rendements FAO (tMF/ha) en NPP (gC/m^2) selon les catégories de cultures.

 $^a{\rm Contenu}$ en hydrates de Carbone (Matière Sèche) des organes récoltés, considéré ici comme égalant 1 - le taux d'humidité

^bexprimé en fraction de MS aérienne récoltée

 $^c\mathrm{Fraction}$ de MS a érienne considérée comme égalant 1 - le taux de racines

^dContenu en Carbone de la MS des organes récoltés et de la plante entière, considéré comme équivalent

facteur de conversion spécifique aux C3 de printemps¹² augmenterait le rapport entre les deux échelles (donc la taille du bâton correspondant) tandis que le facteur spécifique aux deux autres catégories¹³ diminuerait ce rapport (donc la taille des bâtons correspondants).

La figure 3.6 illustre le résultat de la conversion des rendements FAO en NPP comparables aux sorties de simulation. Les différents facteurs de conversion, résultant de la combinaison de coefficients présentés dans le tableau 3.1, conduisent à une homogénéisation des valeurs de NPP FAO, que l'on prenne en compte ou non les catégories "reste agri." et "autre" dans la moyenne des autres cultures. On constate que les NPP ainsi dérivées des statistiques de rendements sont comprises dans une fourchette bornée par les valeurs simulées par ORCHIDEE-STICS avec ou sans irrigation. Ceci est vrai pour les surfaces cultivées initialement non étudiées (Fig. 3.6, milieu) et reste vrai pour la moyenne européenne toutes cultures, malgré la différence de contribution des surfaces déjà étudiées (48% d'après le modèle et 36% d'après la FAO). En moyenne sur l'Europe, ceci signifie que la simulation avec irrigation surestime de +10% la NPP dérivée des données FAO toutes cultures confondues, et la simulation sans irrigation la sous-estime de -5%. Les surfaces initialement non étudiées ont d'après le modèle une NPP moyenne de 729 qC/m^2

Les surfaces initialement non étudiées ont d'après le modèle une NPP moyenne de 729 gC/m^2 CROPi (resp. 561 gC/m^2 CROP) soit de -21% (resp. -37%) inférieure à celle des surfaces en C3 d'hiver et C4 sur les 5 pays, 855 gC/m^2 (resp. 817 gC/m^2) pour CROPi et CROP), d'où la moyenne européenne plus faible, 789 gC/m^2 (resp. 683 gC/m^2). D'après la FAO, la différence relative entre les deux zones est de -25%.

Ces résultats montrent un très bon accord entre productivités agricoles simulée et observée à l'échelle de l'Europe en moyenne sur la période récente. On aurait tendance à en déduire

- que tout l'écart entre rendements des différentes catégories de cultures est dû à un stockage d'eau et une répartition de la biomasse entre parties aériennes et racinaires différents 3.1 et pas du tout à une différence d'assimilation nette de carbone selon le type de plante en amont de l'allocation aux organes
- et que tout l'écart entre rendements des différentes zones géographiques est lié à la variabilité spatiale de l'assimilation nette de carbone.

Attention cependant, ces conclusions sont fortement dépendantes des hypothèses sur le choix des coefficients intervenant dans la conversion. Or ceux-ci sont approximatifs, surtout pour la catégorie "autre", qui regroupe des cultures à schéma d'allocation assez différent et à contribution variable à la surface totale couverte par cette catégorie. Ces coefficients pourront être ultérieurement affinés.

A l'échelle européenne, on peut considérer que le PFT C3 de printemps basé sur les paramètres du soja représente raisonnablement bien l'ensemble des cultures autres que le blé, l'orge, le colza et la maïs (Fig. 3.6). N'oublions pas cependant que sa réponse aux pratiques culturales ne reproduit pas celle déduite des rendements observés. Le soja n'a pas été calibré initialement pour être utilisé sur des zones où il n'est habituellement pas cultivé. Il serait plus juste de tester les paramètres de STICS définis pour une autre culture pour représenter ce PFT dans le modèle. Ceci a déjà été suggéré suite aux analyses de la phénologie simulée et observée (chapitre 2). Parallèlement, les pratiques agricoles renseignées en entrée de simulation devront être spatialisées en vue d'une meilleure simulation de la dépendance de la productivité et du rendement aux facteurs technico-économiques, facteurs déterminant l'obtention ou non du potentiel défini par les conditions pédo-climatiques.

Le fait de ne pas disposer dans ORCHIDEE-STICS de schéma d'allocation d'assimilats vers un compartiment d'intérêt agronomique empêche l'estimation mécaniste, directe, de la fraction

 $^{^{12}}$ rappel : céréales hors blé, orge et maïs + oléagineux hors colza + légumineuses

 $^{^{13}}$ rappel : "reste agri." = pomme de terre + betterave sucrière + légumes et "autre" = fourrages + fruits + légumes etc.

de carbone stockée dans de la matière qui sera récoltée. Cette matière extraite du système et ne contribuera pas à alimenter la litière et le sol en substrat de décomposition, dont dépend, parmi d'autres facteurs, le flux de respiration hétérotrophe. Or on souhaite aussi obtenir une bonne estimation non seulement de la moyenne mais aussi de la variabilité inter-annuelle et spatiale de ce terme en utilisant ORCHIDEE-STICS dans des études du bilan de carbone à grande échelle.

ORCHIDEE-STICS apporte une amélioration notable par rapport à la simulation NoCROP, trop productive de +39% sur l'Europe par rapport à la simulation CROP.

En résumé, il faut avoir conscience que plusieurs éléments, sources d'incertitude, rendent la comparaison des résultats de simulation d'ORCHIDEE-STICS aux données de rendement de la FAO délicate. Il s'agit de :

- la définition du rendement d'une culture et le choix du traitement pour la comparaison modèle-données
- la définition et répartition des surfaces agricoles dans le modèle et les données
- la définition des PFT et l'objectif de représentativité de chacun d'eux (utilisation locale spécifique ou intégration européenne)

La productivité moyenne actuelle (représentative du début des années 2000) est bien simulée à l'échelle des quatre pays par ORCHIDEE-STICS pour le PFT "cultures en C3 d'hiver" en comparaison avec les données FAO du blé seul ($\approx 5.7t$ matière fraîche de grains/ha, soit $\approx 350 gC degrains/m^2$). En regroupant, du côté des données FAO, le blé avec les autres cultures d'hiver moins productives comme l'orge et le colza, la productivité moyenne observée devient plus faible et le PFT "cultures en C3 d'hiver" qui est censé représenter l'ensemble des trois cultures tend donc à sur-estimer la productivité. Cette légère sur-estimation (+8%) est compensée par une sous-estimation plus importante de la productivité du maïs (seule culture en Europe correspondant au PFT "cultures en C4") couvrant une plus faible surface. La productivité est trop faible de moitié pour les pays méditerranéens. Cette compensation conduit à une bonne estimation de la productivité intégrée sur ces deux PFT sur les quatre pays : l'écart modèle-données vaut de +1% (CROPi) à -7% (CROP). L'effet du choix du coefficient "indice de récolte" est plus important dans le résultat que celui des surfaces considérées pour l'agrégation de la productivité des deux PFT et quatre pays. La productivité de l'ensemble de ces deux PFT est bien simulée aussi sur le reste de l'Europe, en dehors des quatre pays. Quant aux autres cultures censées être représentées par le PFT "cultures en C3 de printemps", leur productivité est bien simulée à l'échelle intégrée sur l'Europe, mais la distribution de cette productivité entre les quatre pays et les autres pays (-25% d'après la FAO) ne l'est pas. Finalement la NPP annuelle moyenne européenne toutes cultures confondues est bien estimée avec ORCHIDEE-STICS dont les deux simulations extrêmes en termes d'irrigation encadrent les données (CROPi $\approx 790 gC/m^2$, CROP $\approx 680 gC/m^2$). Ceci n'est pas le cas avec la simulation NoCROP, trop productive de $\approx 40\%$, à cause, en particulier, de la saison de croissance irréalistement longue des herbacées pseudoagricoles.

Ce qu'il faudrait améliorer :

- Réponse du PFT C3 d'hiver aux températures trop chaudes
- -Paramètres de la photosynthèse du PFT C4
- $\ Adaptation \ du \ PFT \ C3 \ de \ printemps \ aux \ conditions \ pédo-climatiques \ et \ technico-énonomiques$
- Spatialisation des paramètres du sol et des pratiques culturales
- Raffinement de la conversion NPP $\longleftrightarrow \to$ rendement ou création d'un schéma d'allocation spécifique

3.2 Réponse des cultures aux extrêmes 1976 et 2003

On poursuit avec l'étude non plus de la productivité moyenne mais de sa variabilité interannuelle. Tandis qu'on a analysé la productivité à l'échelle de pays (article Smith *et al.* [soumis]) et agrégée sur l'Europe (partie 3.1), on veut dans cette seconde partie tester le modèle à l'échelle régionale. On a pour cela combiné les données EUROSTAT aux donnés FAO. La productivité des PFT C3 d'hiver et C4 est comparée à ces données pour le blé et pour le maïs. On s'intéresse en particulier aux années extrêmes 1976 et 2003 et à trois régions fortement cultivées.

3.2.1 Intensité des anomalies de productivité simulées et observées

3.2.1.1 Intensité de la chute de productivité en 1976 et 2003

On entend ici par "intensité", l'anomalie de productivité rapportée à l'écart-type calculé sur la période 1972-2003. Que celle-ci soit calculée sur la variable NPP ou sur le rendement, le résultat est le même (car les coefficients de conversion de l'un en l'autre, vus en partie 3.1, interviennent sur les deux termes de la division). Si cette anomalie dépasse $\pm 2\sigma$, on considère qu'elle est si-gnificative, ce qui signifie que l'année extrême étudiée se détache de la variabilité inter-annuelle "normale".

D'après les données EUROSTAT, complétées par les données FAO lorsque les premières n'étaient pas disponibles, les deux années extrêmes se traduisent par une importante chute de productivité (Fig. 3.7). La intensité de cette perte de productivité varie cependant selon la zone de l'europe et la culture. Pour les deux cultures, l'anomalie 2003 est plus significative que l'anomalie 1976 ; elle atteint jusqu'à -4σ en 2003 (Fig. 3.7a. et b. bas droite) alors qu'elle est de l'ordre de -2σ en 1976 (Fig. 3.7a. et b. bas gauche). Pour le blé comme pour le maïs, ce sont surtout les pays de l'arc alpin (France, Allemagne, Italie) qui sont touchés en 2003 tandis que l'Italie est peu affectée en 1976. Dans tous les cas l'Espagne est peu concernée par ces anomalies négatives de productivité ; celle-ci y est même localement légèrement favorisée, pour le blé plus que pour le maïs.

ORCHIDEE-STICS (simulation CROP) reproduit bien cette dernière observation, qui place l'Espagne en dehors de la zone principalement affectée par les deux anomalies climatiques (Fig. 3.7a. et b. haut). Le pattern spatial général de la chute de productivité est bien simulé, caratérisé par une anomalie centrée sur le Nord de la France en 1976 et sur les Alpes en 2003. Ce pattern correspond à celui du forçage présenté dans l'article Smith *et al.* [soumis] (Fig. 6). En revanche, l'intensité des deux anomalies simulées en 1976 et 2003 est équivalente, ce qui n'est pas en accord avec les observations qui font ressortir l'extrême 2003 pour les deux cultures. Rappelons que l'écart-type est plus important dans le modèle que dans les données, ce qui tend à minimiser l'intensité des anomalies simulées. Régionalement¹⁴ l'accord modèle-données est inégal (lorsqu'il est observable, i.e. si les données EUROSTAT par NutsII sont disponibles). Il est bon pour le maïs en 1976 dans le sud de l'Italie et le Nord de l'Espagne (Fig. 3.7b. gauche) mais mauvais pour le Nord de l'Italie et l'Autriche pour le blé en 1976 (Fig. 3.7a. gauche), zones où une légère augmentation de productivité est constatée. L'observation du fait qu'en 2003 la productivité du maïs est la plus significativement réduite en Italie (Fig. 3.7b. droite) et celle du blé en France (Fig. 3.7a. droite) n'est pas reproduite.

On retiendra que la chute de productivité à laquelle le blé et le maïs ont été soumis en 1976 et 2003 sur l'ensemble des 5 pays étudiés est significative. Le maïs a souffert généralement plus que le blé. Le modèle, qui capture bien le signal au premier ordre, doit être amélioré (spatialisation des données techniques) en vue d'une reproduction des caractéristiques plus fines de ces anomalies. Qu'en est-il du phasage inter-annuel entre anomalies de productivité simulées et observées

¹⁴on entend ici à l'intérieur de pays



FIG. 3.7 – Intensité de l'anomalie de rendement ((rendement - moyenne) / écart-type) du blé et du maïs en 1976 et 2003, simulée par ORCHIDEE-STICS et observée dans les données régionales EUROSTAT, complétées des données FAO.



FIG. 3.8 – Séries de rendements normalisés (centrés-réduits) sur la période 1972-2003 simulées (CROP rouge, CROPi bleu) pour le maïs en Italie (Pô) comparées à la série EUROSTAT (noir).

sur une région ciblée?

3.2.1.2 Phasage des anomalies interannuelles à l'échelle régionale

On s'intéresse ici à une région italienne que nous nommerons "Pô" composée de 6 NutsII (IT2, IT31-33, IT4 et IT51) dont la productivité a été agrégée pour le maïs dans les données et dans les simulations en cohérence avec les surfaces respectivement associées. La figure 3.8 s'apparente à celle présentée dans l'article Smith et al. [soumis] en partie II.B.3 pour l'Italie entière. A l'échelle nationale on constatait (Fig. 5) que la canicule de l'été 2003 entrainait, dans les observations comme dans les simulations, une anomalie de productivité significative, supérieure à celle quasinulle causée par la sécheresse de 1976. A l'échelle régionale (Pô) en revanche, l'anomalie simulée est équivalente pour les deux années (faible) (Fig. 3.8). Nous ne disposons pas de l'information sur la contribution de la plaine du Pô à l'anomalie nationale observée en 2003. La corrélation calculée entre les différentes séries à l'échelle nationale montrait un bon phasage entre la série CROPi et la série FAO (R=0.73), et un phasage un peu moins bon pour la série CROP (R=0.48). A l'échelle de la Plaine du Pô, la correlation avec la série EUROSTAT est bonne et quasi-identique, que l'irrigation soit ou non activée dans la simulation avec ORCHIDEE-STICS (R=0.67) (Fig. 3.8). La plaine du Pô semble moins sensible que l'Italie dans son ensemble à l'irrigation. Dans tous les cas (échelle nationale ou régionale) la simulation NoCROP reste la moins bien corrélée avec la série FAO (R=0.35 et 0.43 respectivement).

3.2.2 Caractéristiques des anomalies de forçage climatique en 1976 et 2003

3.2.2.1 Distribution spatiale

La figure 3.9 illustre à nouveau la position des anomalies maximales de rayonnement, température et précipitations enregistrées en 1976 et 2003, respectivement centrées sur le Nord de la France et sur les Alpes. Elle confirme que l'extrême 2003 peut être qualifié de canicule estivale tandis que l'extrême 1976 mérite plutôt le nom de sécheresse. En effet la température moyenne de juin à août est augmentée en 2003 de plus de $+6^{\circ}C$ (au centre de l'anomalie) (Fig. 3.9 milieu droite), tandis qu'elle est n'est, en 1976, que de moins de $+2^{\circ}C$ supérieure, en moyenne sur mai-juillet (au centre de l'anomalie) (Fig. 3.9 milieu gauche), à celle de la période 1972-2003, habituellement comprise entre 15 et $18^{\circ}C$ en France et Allemagne. Le déficit de précipitations entre janvier et août en 1976 atteint -300mm sur les zones fortement agricoles du nord de la France, voire même -400mm sur les zones habituellement très arrosées que sont la pointe Nord-Ouest de l'Espagne, celles de la Bretagne et de la Cornouailles (Fig. 3.9 bas gauche). Ce



FIG. 3.9 – Anomalies de forçage climatique en 1976 (gauche) et 2003 (droite) par rapport à la moyenne 1972-2003. Pour les variables rayonnement courtes longueurs d'ondes journalier incident (R, haut) et température moyenne journalière (T, milieu), c'est l'anomalie maximale moyenne sur 3 mois consécutifs qui est illustrée, soit mai-juillet en 1976 et juin-août en 2003. Pour les précipitations (P, bas), on présente le cumul de janvier à août. La couleur rouge indique pour R et T une anomalie positive et pour P une anomalie négative (sécheresse). Les contours localisent les 3 régions pour lesquelles des cycles saisonniers seront présentés dans la suite du chapitre.

déficit important correspond à $\approx 60\%$ des précipitations habituelles. Ces valeurs anormales sont les mêmes en 2003, mais l'anomalie de précipitations est plus resserrée autour des Alpes et affecte ainsi moins les zones fortement agricoles européennes (Fig. 3.9 bas droite). Le Nord de la France et le Nord-Ouest de l'Allemagne (repérées par le contour noir), par exemple, connaissent un déficit de précipitation plus faible que -100mm mais une augmentation de température atteignant $+4^{\circ}C$. Du côté du rayonnement visible incident, l'anomalie est de même intensité en 1976 et $2003 (+40W/m^2$ au centre de l'anomalie) (Fig. 3.9 haut) et correspond à $\approx 15\%$ du rayonnement habituel à la même période.

Le Nord de l'Italie (répéré par le contour noir épais) est dans plusieurs cas une zone de transition entre anomalies positives et négatives. L'Espagne est éloignée géographiquement des centres des anomalies climatiques, ce qui peut être mis en lien avec les faibles répercussions sur la productivité simulées et observées en partie 3.2.1 (Fig. 3.7). En revanche, la chute de productivité du maïs significative simulée et observée en 1976 sur la petite zone du Nord-Ouest de la péninsule peut être reliée au manque de précipitation localement très prononcé, non compensé par l'irrigation dans la simulation CROP (Fig. 3.7b. gauche).

On remarque une légère différence d'intensité de l'anomalie de température entre la figure 3.9 et la figure correspondante dans l'article Smith *et al.* [soumis] (Fig. 6). Celle-ci est due au fait ce que les anomalies ont été calculées ici à partir d'une simulation de 34 ans (OS.1976&2003) forcée par des variables de même provenance sur toute la période (CRU+NCEP, Comm. Pers. Viovy) alors qu'elles l'ont été à partir de deux simulations de 10 ans distinctes (OS.1976 et OS.2003), forcées chacune avec des données produites différemment (resp. CRU et CRUNCEP). Les précisions sur ces simulations se trouvent au chapitre 1 (partie 1.3.5). Pour ce type d'analyse d'évènements extrêmes il serait bon de disposer de forçages climatiques finement validés, mais ce travail n'a pas été pas entrepris dans le cadre de ma thèse.

Les trois régions dont le contour est affiché sur les cartes de la figure 3.9 sont celles qui ont été choisies pour illustrer les cycles saisonniers de différentes variables dans la suite du chapitre. Elles combinent l'avantage de regrouper des pixels à forte couverture agricole et celui d'être des zones affectées de façon différente par les deux anomalies climatiques. Comme il ne s'agit pas dans cette partie de comparer des sorties de simulations locales à des données sur site, on s'est permis d'agréger les résultats des pixels les uns avec les autres (en tenant compte de leur occupation relative par les PFT cultures en C3 d'hiver et en C4 lorsque cela était nécessaire) pour en dégager une réponse de premier ordre.

3.2.2.2 Développement temporel

Il apparait clairement sur la figure 3.10**a**. que la région du Nord de la France (gauche) est la plus affectée des trois en 1976, au vu des anomalies détectées dans les trois variables de forçage. La figure 3.10**b**. montre que c'est la plaine du Pô (droite) qui est la plus touchée en 2003, en termes de déficit de précipitation (-200mm cumulés de janvier à août) et d'excès de rayonnement (marqué de mi-mars à mi-septembre). C'est moins net pour la température ; les pics de juin et août sont moins marqués que pour le Nord de la France et le Nord-Ouest de l'Allemagne. Ceci est dû à la bande de refroidissement au sud des Alpes (Fig.3.9 milieu droite) qui atténue l'anomalie positive de température lors de l'agrégation. C'est en Italie que le rayonnement et la température sont les plus élevés et qu'il pleut le plus en moyenne (trait pointillé), avec 900mm annuels contre 700mm en France et Allemagne¹⁵.

En France, en 1976 (Fig. 3.10a. gauche), l'anomalie de précipitations se développe dès le mois de janvier ; le déficit s'accumule jusqu'au mois d'août où il dépasse 50% des 400mm normalement

¹⁵on emploiera dans la suite du chapitre les noms de pays France, Allemagne et Italie en désignant en réalité les 3 regions choisies à l'intérieur de ces pays



FIG. 3.10 – Forçage climatique en 1976 **a.** et 2003 **b.** (trait plein) comparé à celui moyenné sur la période 1972-2003 (trait pointillé) pour 3 régions choisies : le Nord de la France (gauche), le Nord-Ouest de l'Allemagne (milieu) et la Plaine du Pô en Italie (droite). Les variables présentées sont R (haut) et T (milieu) en moyenne glissante sur 10 jours et P (bas) en cumul annuel.

déjà tombés à cette époque de l'année. A partir de septembre (en parallèle avec l'annulation de l'anomalie de rayonnement), la pluie redevient plus abondante qu'en moyenne sur 30 ans donc l'anomalie cumulée diminue, pour ne constituer plus que 200mm en fin d'année. En Allemagne et Italie, en 1976, on observe que l'anomalie cumulée de précipitations n'est pas toujours négative. En Italie, à partir de juillet, les précipitations augmentent fortement (en parallèle d'une anomalie négative de rayonnement au deuxième semestre), annulant quasiment l'anomalie fin août et inversant l'anomalie annuelle (+100mm). Le phénomène est similaire à ce qui vient d'être décrit pour la France mais avec deux mois d'avance. En Allemagne au contraire c'est en tout début d'année qui pleut deux fois plus qu'en moyenne mais cet excès d'eau est compensé par un manque d'eau le restant de l'année, amenant l'anomalie annuelle à quasiment -200mm, comme en France quantitativement, malgré un cycle saisonnier différent.

Par quels processus ces anomalies de rayonnement, température et précipitations conduisentelles aux changements de productivité annuelle constatés en partie 3.2.1.1? Comment expliquer la réponse différentielle du blé et du maïs aux deux signaux extrêmes aux caractéristiques différentes ?

3.2.3 Changements d'efficience d'utilisation de l'eau

Ce qu'on appelle ici efficience d'utilisation de l'eau (WUE) est le rapport entre la productivité nette (NPP) et la transpiration annuelles. Elle permet de savoir, en cas de changement de productivité comme en 1976 et 2003, si le nombre de gC/m^2 de carbone produits par mm d'eau transpirée a évolué ou si les deux termes ont changé dans les mêmes proportions sans modification d'efficience. Ceci peut renseigner sur les processus intervenus dans la chute de productivité à l'échelle de la plante. La figure 3.11 présente en parallèle le changement de NPP (**a**. et **b**. haut) et le changement de transpiration (**a**. et **b**. bas) dûs aux deux années extrêmes.

3.2.3.1 Evolution normale et anormale de la NPP et la transpiration

Pour chaque culture, dont les cycles saisonniers sont illustrés pour la région où elle est principalement cultivée, le palier atteint par la NPP cumulée en 1976 (Fig. 3.11 gauche) et en 2003 (Fig. 3.11 droite) est plus faible qu'en moyenne. Ce sont ces anomalies annuelles dont on a confronté la intensité aux données EUROSTAT en partie 3.2.1.1 Même quand le maïs est irrigué, sa productivité subit une réduction en 1976 et en 2003 en Italie ; le niveau annuel moyen et anormal de NPP restent toutefois supérieurs à celui du maïs non irrigué.

On n'observe pas une réponse aussi homogène de la transpiration. Celle du blé en 1976 en France est légèrement augmentée (mais a atteint le palier plus vite qu'en moyenne) alors qu'elle est diminuée en 2003 (bien qu'ayant été plus élevée qu'en moyenne en début de saison). Celle du maïs (irrigué ou non) est diminuée en 1976 mais inchangée en 2003. La réduction de surface de feuilles influence la transpiration dans le sens d'une diminution et l'augmentation de la demande climatique dans le sens d'une augmentation. Ces facteurs ne génèrent cependant pas forcément de découplage entre assimilation et transpiration au niveau des stomates.

Ces différences de réponse entre NPP et transpiration impliquent que le changement de WUE n'a pas été le même selon les années extrêmes et la culture. Les chutes de productivité simulées ne sont pas toutes passées par les mêmes mécanismes.

3.2.3.2 Réduction de l'efficience d'utilisation de l'eau en 1976 et 2003

Les cartes d'anomalies de WUE, par rapport à la période de référence 1972-2003, sont présentées en figure Fig. 3.12 pour les deux cultures et les deux années (simulation CROP, *i.e.* sans irrigation). Dans l'ensemble, on remarque une réduction de WUE dont la distribution spatiale



FIG. 3.11 – Cumul de NPP (haut) suivi du cumul de transpiration (bas) simulés pour le blé en France **a**. et le maïs en Italie **b**. en 1976 (trait plein, gauche) et 2003 (trait plein, droite) comparés à ceux simulés pour la période moyenne 1972-2003 (trait pointillé). Les courbes rouges représentent la simulation CROP (non irriguée) et les courbes bleues la simulation CROPi (irriguée).



FIG. 3.12 – Anomalie de WUE $(gC/m^2/mm)$ calculée à partir des cumuls annuels de NPP et transpiration simulés pour le blé en France **a**. et le maïs en Italie **b**. en 1976 (gauche) et 2003 (droite). La couleur rouge indique une réduction de WUE par rapport à la période de référence 1972-2003.

correspond grossièrement à celle de l'anomalie de forçage. Cette réduction est dûe à une diminution de la transpiration plus faible (voire une augmentation) que celle de la NPP. La réduction de WUE est plus forte, en 1976 et en 2003, pour le maïs (Fig. 3.12b.) que pour le blé (Fig. 3.12a.), comme en témoignent les valeurs avoisinant -4 et -2 $gC/m^2/mm$ (au centre de l'anomalie) respectivement.

En 1976, le cas de la plaine du Pô est intéressant, le blé y voit sa WUE diminuée tandis que celle du maïs est augmentée. On se souvient de l'évolution temporelle de l'anomalie de rayonnement et de précipitations au cours de l'année en Italie en 1976 (Fig. 3.10**a.** droite) : excès de rayonnement et déficit de précipitations en début d'année et l'opposé en fin d'année. Or le cycle de croissance du blé se positionne entre début mars et fin juin tandis que celui du maïs démarre en juin et dure jusqu'à fin octobre.

On comprend que la phénologie joue ici un rôle important en exposant les phases critiques du développement des deux cultures à différentes saisons de l'année et phases d'installation d'anomalies climatiques éventuelles. Elle contribue à la différence de réduction de WUE entre blé et maïs, mais ne l'explique pas entièrement. Nos résultats montrent une réduction de WUE chez le soja (non illustré), moyennement forte les deux années $(-3gC/m^2/mm)$ au centre de l'anomalie), comprise entre celle du blé et du maïs. Or le soja est de type photosynthétique C3 comme le blé mais a une phénologie de type "printemps" comme le maïs. On en déduit que la WUE a été moins réduite en 1976 et 2003

- chez le blé d'hiver que chez les cultures de printemps (maïs et soja) non irriguées

- chez les cultures en C3 que chez le maïs (C4) non irrigué

3.2.3.3 Rôle de l'irrigation

La figure 3.13a. présente de façon synthétique pour chacune des deux cultures la NPP (en ordonnée) et de la transpiration (en abscisse) annuelles moyennes et leur réponse aux extrêmes 1976 et 2003 sur les trois régions choisies. Le changement d'efficience d'utilisation de l'eau s'interprête comme le franchissement, en passant des valeurs moyennes aux valeurs extrêmes, des lignes matérialisant le nombre de gC/m^2 incorporés à la biomasse par mm d'eau transpirée. On y retrouve les résultats précédents, la plus grande réduction de WUE pour le maïs que pour le blé, ainsi que le cas particulier de l'Italie en 1976 où la WUE est augmentée, en lien avec un forçage climatique anormal mais en oppositon par rapport à la sécheresse qui affecte surtout les zones autour du Nord de France.

Les valeurs moyennes de WUE sont plus resserrées pour le blé (comprises entre 4 et 5 $gC/m^2/mm$, Fig. 3.13**a.** gauche) que pour le maïs (entre 1 et 6 $gC/m^2/mm$, Fig. 3.13**a.** droite), ce qui témoigne d'une moindre variabilité spatiale au sein de la fenêtre européenne étudiée. La forte variabilité spatiale de la WUE du maïs tient plus à celle du terme NPP que de celle du terme transpiration. Elle est exagérée à cause des valeurs trop faibles de NPP moyenne vers le sud de la fenêtre européenne (article Smith *et al.* [soumis] partie II.B et chapitre 3 partie 1), *i.e.* en Italie (et aussi en 1976 en France). La NPP moyenne du maïs en Italie est trop faible même en conditions irriguées. Sur la figure 3.11 (b. haut), on voit que la NPP est négative en début de cycle en Italie en moyenne sur la période 1972-2003 comme en 1976 et 2003, ce qui signifie qu'aucune matière s'accumule. Ceci est dû à deux raisons :

– La respiration autotrophe (\mathbf{R}_a) est trop forte en début de cycle (relativement à la GPP dont elle est déduite pour calculer la NPP). Cette \mathbf{R}_a est la somme de la respiration dite de "croissance" ($R_c = f(GPP)$) et de la respiration dite de "maintenance" ($R_m = f(biomasseenplace)$), vues au chapitre 1 (partie 1.2.2.2). Or cette dernière tient compte de la biomasse du compartiment "réserves d'hydrates de carbone", au contenu important en début de cycle pour le maïs (représentant les graines dans lesquelles la plante puise la matière quand l'assimilation photosynthétique n'est pas encore suffisamment importante.



FIG. 3.13 – Somme annuelle de la NPP (ordonnée) exprimée en fonction de celle de la transpiration (abscisse) pour les 3 régions de France Allemagne et Italie, en moyenne (noir) en 1976 (cyan) et 2003 (magenta) simulée pour le blé **a**. (gauche), le maïs non irrigué (droite) et irrigué **b**. (haut droite). Les valeurs entières (1 à 8) de WUE sont matérialisées par les droites pointillées passant par l'origine. Anomalie de WUE simulée pour le maïs irrigué en 1976 **b**. (haut gauche). Anomalie annuelle d'irrigation simulée en 1976 **b**. (bas gauche) et 2003 **b**. (bas droite) pour le maïs irrigué.

Le blé possède aussi un compartiment "réserves d'hydrates de carbone", mais la valeur initiale de son contenu en carbone a été fixée à un niveau plus faible que celui du maïs. De plus la forte GPP permet d'absorber rapidement cet artéfact, il devient négligeable à la fin de la saison de croissance.

 La GPP est trop faible tout au long du cycle à cause d'une mauvaise paramétrisation de la photosynthèse.

La figure 3.13b. (haut droite), comparée à la figure 3.13a. (droite), montre le rôle important que joue l'irrigation sur l'efficience d'utilisation de l'eau pour le maïs.

- L'irrigation augmente les valeurs moyennes (symboles noirs) à la fois la transpiration et la NPP mais cette dernière dans des proportions plus importantes, d'où les valeurs moyennes d'efficience plus élevées (comprises entre 2 et 7 $gC/m^2/mm$). La pente de la doite qui amène les valeurs moyennes de WUE du maïs non irrigué à celles du maïs irrigué est de $\approx +10gC/m^2/mm$ pour les 3 régions.
- En 1976, l'irrigation atténue la réduction de WUE dûe à la sécheresse (Fig. 3.13b. (haut gauche) comparée à Fig. 3.12b. (gauche)), la ramenant ainsi à un niveau comparable à celui de la perte d'efficience du blé (-2 gC/m²/mm). En effet, le changement de WUE dû à la sécheresse de 1976, passe, en conditions irriguées, surtout par une augmentation de la transpiration sans grand changement de NPP (Fig. 3.13b. (haut droite). L'Italie n'est pas concernée en 1976 car l'anomalie climatique est de signe opposé surtout en deuxième moitié d'année (Fig. 3.10a., droite). Si l'irrigation annule une partie de la perte de WUE par le maïs en 1976, surtout en France, c'est que la culture souffrait entre autres de stress hydrique, que l'irrigation a levé. La cause du reste de la perte d'efficience par rapport à la période de référence semble être liée à un stress d'une autre nature : thermique ou azoté.
- En revanche en 2003, l'irrigation ne parvient pas à empêcher une forte réduction de WUE, surtout en Allemagne, dûe à l'été caniculaire (Fig. 3.13b. (haut droite). Même en conditions irriguées, la NPP est réduite; la transpiration est augmentée comme en 1976. La cause de la perte d'efficience en 2003 doit ainsi être autre qu'hydrique. Attention, le stress hydrique est bien présent puisqu'il déclenche l'irrigation dans STICS, mais il n'est pas la cause de la perte d'efficience du maïs en 2003.

Les résultats obtenus pour le soja sont les mêmes que ceux discutés pour le maïs : l'irrigation augmente l'efficience moyenne d'utilisation de l'eau sur les 3 régions, et atténue (sans la supprimer) sa réduction en 1976 mais n'a pas d'effet en 2003. Quant au blé, si l'irrigation n'a aucun effet c'est parce qu'elle n'est déclenchée qu'une fois ou deux dans la saison, indiquant que la culture souffre très peu de stress hydrique dans STICS. La quantité d'eau apportée par an est de 40 à 80mm (simulée par STICS) contre 150 à 400mm du Nord au Sud pour le maïs. Lors des évènements extrèmes de 1976 et 2003, l'anomalie d'irrigation annuelle du blé est quasi nulle sur les 3 régions, alors qu'elle est de +200mm pour le maïs en 1976 et en 2003 au centre de l'anomalie (Fig. 3.13b. (bas). La distribution spatiale de l'irrigation annuelle en 1976 et 2003 correspond à celle du stress hydrique (qui la déclenche automatiquement dans STICS) donc de la combinaison entre la demande climatique et l'offre en eau du sol. C'est pourquoi cette distribution est corrélée à celle des trois variables climatiques (Fig. 3.9).

Le fait que l'anomalie de température de l'air en 1976 n'ait pas été très importante par rapport à celle de l'été 2003 n'évite pas aux cultures d'ORCHIDEE-STICS de subir un stress thermique. En effet la sécheresse cause une augmentation de la température de surface : la plus grande part de l'énergie échangée avec l'atmosphère sous forme de flux turbulents à l'échelle de la maille passe par le flux de chaleur sensible et une plus faible part passe par le flux de chaleur latente. Une évapo-transpiration plus importante aurait limité l'élevation de la température de surface par son effet refroidissant. A l'échelle des stomates le stress thermique peut expliquer la réduction d'efficience d'utilisation de l'eau. Le flux d'eau par transpiration a diminué en absolu mais à augmenté relativement au flux de CO_2 net (NPP), qui a diminué plus fortement. Ce découplage peut être dû à une diminution du flux brut (GPP) et à une augmentation relative de la part respirée de ce carbone assimilé (respiration autotrophe, R_a).

3.2.4 Changements d'efficience d'assimilation du CO₂

Ce qu'on appelle ici "efficience d'assimilation du CO₂" (CO₂UE) est le rapport entre la NPP et la GPP annuelles. Autrement dit il s'agit du complémentaire de la R_a (annuelle) exprimée en fraction de la GPP $(1 - \frac{R_a}{GPP})$.

3.2.4.1 Diminution de l'assimilation photosynthétique

La figure 3.14 présente le cycle saisonnier de la GPP et de la \mathbf{R}_a , du blé en France et du maïs en Italie, en moyenne et pendant les deux années extrêmes. Le cycle de la GPP suit de près celui de l'indice foliaire, dont le maximum a été atteint plus tôt en 1976 (en France) et en 2003 (dans les deux régions) qu'en moyenne. La valeur de LAI maximale atteinte a été plus faible dans tous les cas. Ces modifications de phénologie ont entraîné pour le blé une anticipation de la sénescence et de la récolte de près d'un mois (début Juillet au lieu de fin Juillet) les deux années. En raison de sa phénologie de type hiver, c'est surtout en fin de saison de croissance que la photosynthèse du blé a été affectée (Fig. 3.14a. haut). Au contraire, la date de récolte du maïs n'a pas été modifiée par la sécheresse de 1976 et la canicule de 2003. C'est en milieu de cycle (voire en début de cycle en 1976) que la photosynthèse du maïs a été la plus réduite (Fig. 3.14b. haut). La réduction de la GPP du maïs en Août 2003 est telle que la culture (irriguée ou non) est moitié moins productive qu'en moyenne à la même période de l'année. Ce creux dans la productivité du maïs en Août est dûe à la fois à une chute de l'indice foliaire et à l'impact négatif des températures excessives (Fig. 3.10). Cependant, la photosynthèse reprend en fin de cycle (Septembre) à un niveau légèrement supérieur au niveau moyen.

Les deux cultures ont subi, au cours des deux étés extrêmes, une réduction de leur surface foliaire verte et de leur capacité photosynthétique. A ces effets s'ajoute pour le blé un racourcissement de la durée du cycle, qui limite par conséquent la durée d'accumulation de biomasse. Intégrée sur l'année, la GPP du maïs non irrigué reste toutefois celle qui a été la plus réduite. L'irrigation joue sur le maïs en moyenne entre mi-Juin et mi-Septembre le rôle attendu : la GPP est plus élevée que sans irrigation, la différence est particulièrement notable en Août. En Août 2003 cependant, l'irrigation ne parvient pas à empêcher la réduction de GPP de 50% évoquée ci-dessus (Fig. 3.14b. haut droite). En Juin 1976, l'irrigation a un effet même sur le blé, à laquelle la GPP et la R_a sont indifférentes en moyenne (Fig. 3.14a. gauche).

3.2.4.2 Augmentation relative de la respiration autotrophe

Le cycle de la R_a du blé suit, comme la GPP, celui de l'indice foliaire, raccourci en 1976 et en 2003 et atteignant un maximum plus faible (Fig. 3.14a. bas). Ce flux de respiration est diminué car la respiration de croissance R_c , liée à la GPP, et la respiration de maintenance R_m , liée à la biomasse en place, sont toutes deux plus faibles qu'en moyenne. La GPP et la R_a peuvent cependant ne pas être réduites dans les mêmes proportions et entraîner un changement dans ce qu'on a nommé ci-dessus l'efficience d'assimilation du CO₂. Les premiers diagrammes de la figure 3.15 permettent de visualiser la part de la GPP qui n'est pas respirée et reste assimilée dans la NPP. Dans le cas du blé, la NPP représente sur une année moyenne $\approx 70\%$ de la GPP et la R_a $\approx 30\%$. En 1976 et en 2003 ces parts relatives, et donc l'efficience d'assimilation du CO₂, ne sont que très légèrement modifiées (tendance à l'augmentation de la R_a) (Fig. 3.15a. gauche).



FIG. 3.14 – GPP (haut) suivie de R_a (bas) en moyenne glissante sur 10 jours simulées par ORCHIDEE-STICS pour le blé en France **a.** et le maïs en Italie **b.**, en 1976 (trait plein, gauche) et 2003 (trait plein, droite) comparés à ceux simulés pour la période moyenne 1972-2003 (trait pointillé). Les courbes rouges représentent la simulation CROP (non irriguée) et les courbes bleues la simulation CROPi (irriguée).



FIG. 3.15 – Somme annuelle de la NPP (ordonnée) exprimée en fonction de celle de la GPP (abscisse) pour les 3 régions de France Allemagne et Italie, en moyenne (noir) en 1976 (cyan) et 2003 (magenta) simulée pour le blé **a.** (gauche), le maïs non irrigué (droite) et irrigué **b.** (droite). Les valeurs de CO_2UE sont matérialisées par les droites pointillées passant par l'origine (de 10% à 100% de bas en haut). Anomalie annuelle de respiration autotrophe simulée en 1976 pour le maïs non irrigué **c.** (gauche) et irrigué **c.** (droite).

Dans le cas du maïs, le cycle de la R_a est également lié à celui de la GPP et de l'indice foliaire, mais de façon moins flagrante (Fig. 3.14b. bas). On retrouve avec la R_a les constatations précédentes sur la GPP : les changements dûs aux étés extrêmes de 1976 et 2003 sont plus importants respectivement en Juin et en Août. Ces changements abaissent la R_a du maïs irrigué au niveau de celle du maïs non irrigué à la même période pendant une année moyenne. Cette réduction est cependant inférieure à la réduction notée pour la GPP ($\approx 50\%$) en Août 2003 : elle est pour la R_a de l'ordre de $\approx 30\%$. Ceci rappelle que la respiration de maintenance des tissus n'est pas uniquement contrôlée par la quantité de matière synthétisée (plus faible) mais aussi par la température. A biomasse égale, les températures excessives d'Août 2003 tendent à accentuer la respiration. Ces deux effets vont dans un sens opposé. L'effet final est une réduction du flux de respiration à l'échelle de la maille, moins importante que la réduction de la GPP, donc une augmentation relative de la respiration à l'échelle de la plante. Ce résultat, intégré sur l'année, est illustré par la figure 3.15a. (droite). Sur l'ensemble des trois régions, l'effet des étés extrêmes sur le maïs va dans le sens de diminuer l'efficience d'assimilation du CO₂ (comprise entre 35 et 50% en moyenne) via une augmentation relative de la R_a annuelle.

En situation irriguée, l'efficience d'assimilation du CO_2 moyenne est comprise entre 50 et 55%, soit supérieure à celle obtenue en situation non irriguée. (Fig. 3.15b.). Malgré l'irrigation cette efficience est réduite en 2003 dans les trois régions. En 1976 l'irrigation annule l'effet de la sécheresse sur la R_a du maïs (Fig. 3.15c.). La R_a du maïs, bien qu'un peu réduite en absolu en Italie comme on peut le voir sur la figure 3.14b. (bas gauche), est augmentée en 1976 non seulement en relatif mais aussi en absolu, en France et en Allemagne dans la simulation CROP. Dans la simulation CROPi, la respiration autotrophe n'est quasiment pas modifiée. L'irrigation, en augmentant la transpiration, permet de réduire la température de surface élevée à cause de la sécheresse. Elle réduit ainsi l'excès de respiration par rapport à la moyenne, ce qu'elle ne fait pas pendant l'été 2003 caniculaire mais moins sec, donc moins sensible à l'irrigation.

La différence de réponse du blé et du maïs aux extrêmes 1976 et 2003 en terme d'efficience d'assimilation du CO_2 peut s'expliquer de deux façons. Grâce à sa phénologie de type "hiver" le blé esquive partiellement les fortes températures estivales (de l'air en 2003 et de la surface en 1976) qui sont à l'origine de l'augmentation relative de la R_a . Le début de cycle est peu affecté. Le maïs en revanche subit ces températures pendant la phase où sa GPP est maximale. La deuxième explication est l'artéfact déjà évoqué (partie 3.2.3.3) dans le rapport entre R_a et GPP, dû au contenu élevé du compartiment "réserves d'hydrates de carbone" pour le maïs. Cet artéfact apparaît lorsque les valeurs de GPP sont faibles. Comme les deux évènements extrêmes tendent à réduire la GPP, elles augmentent artificiellement la R_a .

3.2.4.3 Discussion

Le stress thermique apparaît comme étant le facteur principal de la chute de productivité des cultures en 1976 et 2003. Une analyse plus poussée serait nécessaire pour conclure avec certitude. On s'est limité ici à la première étape consistant à

- relier la chute des rendements et de la NPP à la transpiration, la GPP et la respiration autotrophe,
- dégager des differences entre cultures et entre années extrêmes, et
- quantifier le rôle de l'irrigation.

Il faudrait poursuivre en décomposant précisément les parts du stress thermique, du stress hydrique, du stress azoté et des changements de la phénologie dans la réponse de chaque type de cultures à chacun des deux extrêmes. L'analyse complémentaire des modifications des flux de chaleur sensible et de chaleur latente, du rapport entre les deux (Rapport de Bowen), du contenu en eau du sol et de l'évapo-transpiration potentielle (ETP) donnerait une meilleure compréhension des mécanismes en jeu. Les corrélations entre anomalies des variables simulées et variables climatiques pourraient être calculées sur les cycles saisonniers, la variabilité inter-annuelle et la dstribution spatiale.

Notre étude préliminaire a été menée à l'échelle d'un ensemble de quelques régions NutsII, échelle à laquelle on a utilisé les données de rendements EUROSTAT. Rappelons qu'un des buts de cette thèse était de donner une vision européenne du comportement des cultures pendant deux années extrêmes. Malgré les limites de l'approche ORCHIDEE-STICS, on considère, suite à l'évaluation effectuée au chapitre 2, dans l'article Smith *et al.* [soumis] et dans la première partie de ce chapitre 3, que les cultures sont mieux modélisées qu'avec ORCHIDEE seul. ORCHIDEE-STICS peut ainsi être utilisé comme un outil diagnostique comme on l'a fait en deuxième partie de ce chapitre 3. Pour évaluer plus finement les processus de la croissance des cultures affectés en 1976 et 2003, il faudrait comparer les simulations à des mesures sur sites agricoles. On pourrait ainsi plus facilement interpréter ce qui s'est passé à l'echelle de la plante, des feuilles et des stomates. La justesse du forçage climatique local et la disponibilité d'informations sur les pratiques culturales pourraient être exploitées.

La cause primaire de la chute de productivité des arbres mesurée sur plusieurs sites FluxNet entre 2002 et 2003 était, d'après l'étude de Reichstein *et al.* [2007], plutôt le stress hydrique que le stress thermique. Cette étude a montré une légère réduction entre 2002 et 2003 de l'éfficience de l'utilisation de l'eau par les arbres (exprimée par le rapport mensuel de la GPP sur l'evapo-transpiration), inférieure à la différence entre sites. Dans notre étude, la réduction annuelle de WUE est plus forte (même si on l'exprime à partir de la GPP). La comparaison des résultats d'ORCHIDEE-STICS aux mesures sur sites agricoles permettrait de comprendre si les différences d'interprétation sont liées à des biais dans les mesures et dans le modèle (hypothèse que le stress hydrique trop faible dans ORCHIDEE) ou à de réelles différences de comportement entre écosystèmes cultivés et forestiers.

Dans les deux études, ainsi que dans celle de Ciais *et al.* [2005], la chute de productivité observée et simulée en 2003 pour les écosystèmes européens reste indéniable. Combinée à d'éventuelles modifications de la respiration du sol, cette chute de productivité végétale a le potentiel de modifier fortement le flux net de CO_2 à l'échelle de l'Europe. C'est ce flux net de CO_2 qui fait l'objet du chapitre suivant.

Synthèse sur la productivité moyenne, inter-annuelle et extrême des cultures

(Article Smith et al. [soumis] et Chapitre 3)

L'assimilation photosynthétique brute et nette a été calculée avec ORCHIDEE-STICS sur la base du nouveau LAI des cultures. La correspondance entre rendements observés et NPP annuelle simulée a été faite à partir de coefficients (taux d'humidité dans les grains, d'organes récoltés dans la biomasse aérienne, de racines dans la biomasse totale et de carbone dans la matière sèche) tirés de STICS et de la littérature. On a comparé aux statistiques FAO, auxquelles on a soustrait la tendance croissante, la productivité¹⁶ simulée pour les cultures en C3 d'hiver (blé, orge et colza) et en C4 (maïs) sur les quatres pays principaux de la fenêtre européenne étudiée. En complément à cette évaluation sur la France, l'Allemagne, l'Espagne et l'Italie, on a évalué la productivité moyenne simulée pour les cultures en C3 de printemps (nombreuses) et sur le reste de l'Europe, afin de conclure à l'échelle européenne sur la représentativité des trois PFT agricoles.

L'estimation par ORCHIDEE-STICS de la productivité intégrée sur ces deux premiers PFT sur les quatre pays est bonne, bien qu'elle cache des compensations d'erreurs. La productivité de l'ensemble de ces deux PFT est bien simulée aussi sur le reste de l'Europe, en dehors des quatre pays. Quant aux autres cultures censées être représentées par le PFT "cultures en C3 de printemps", leur productivité est bien simulée à l'échelle intégrée sur l'Europe, mais la distribution de cette productivité entre les quatre pays et les autres pays (-25% d'après la FAO) ne l'est pas. Finalement la **NPP annuelle moyenne européenne toutes cultures confondues est bien estimée avec ORCHIDEE-STICS** dont les deux simulations extrêmes en termes d'irrigation encadrent les données (CROPi $\approx 790gC/m^2$, CROP $\approx 680gC/m^2$). Ceci n'est pas le cas avec la simulation NoCROP, trop productive de $\approx 40\%$, à cause, en particulier, de la saison de croissance irréalistement longue des herbacées pseudo-agricoles.

ORCHIDEE-STICS simule des rendements du blé plus élevés en France qu'en Espagne et Italie, de même qu'LPJmL, en moyenne sur les années 1990 [Bondeau *et al.*, 2007, Fig. 8-11, p691-693] (en Annexe B). A l'échelle globale, les rendements du Nord-Ouest de l'Europe sont les plus élevés et ceux d'Asie centrale les plus faibles. La variabilité spatiale des rendements moyens du blé estimée par LPJmL est bien corrélée à celle observée par la FAO (R = 0.82, sur 45 pays). Pour les rendements du maïs, la corrélation est de 0.74 (41 pays). Les rendements les plus élevés sont atteints dans les pays tempérés, à gestion intensive et recours à l'irrigation sans limitation. Les écarts modèle-données sont importants dans les pays tropicaux, mais la sous-estimation des rendements du maïs dans les pays méditerranéens simulée par ORCHIDEE-STICS ne se retrouve pas dans les résultats d'LPJmL. Au Canada et aux Etats-Unis, l'extensivité de la culture du blé et du maïs fait que leur rendement est plus faible qu'en Europe.

L'amplitude de la variabilité inter-annuelle relative¹⁷ simulée par ORCHIDEE et ORCHIDEE-STICS (1972-2003) est toujours légèrement supérieure à celle observée, $\approx 10\%$. Cet excès de variabilité simulée par les modèles par rapport aux données statistiques, par construction un peu lissées, est inévitable selon Challinor *et al.* [2005]. L'amplitude de la variabilité reste cependant mieux estimée par le modèle intégrant les cultures. L'irrigation, en particulier pour le maïs tend à atténuer de 40% la variabilité. Le couplage avec STICS améliore, lorsqu'elle est significative, la corrélation des séries simulées d'anomalies inter-annuelles de productivité à la série FAO. La prise en compte d'un taux réaliste d'irrigation plutôt qu'une fourchette irrigation nulle/optimale pourrait l'améliorer encore. A l'échelle régionale, la corrélation est bonne avec les données EUROSTAT par exemple pour le maïs dans la Plaine du Pô. Une des explication à l'**amélioration à la fois de l'amplitude et de la corrélation de la variabilité simulée** est la meilleure phénologie forcée par STICS. Grâce aux nouveaux cycles saisonniers réalistes de LAI de cultures d'hiver et de printemps, la productivité simulée par ORCHIDEE-STICS répond à la même variabilité climatique que le fait le rendement observé (aux dates de semis/récolte et dose d'irrigation/fertilisation près). La productivité simulée par ORCHIDEE en revanche intègre la variabilité climatique sur une période plus grande de l'année en raison du cycle saisonnier plus long des herbacées pseudo-agricoles.

La distribution spatiale et l'intensité (supérieure à deux fois l'écart-type sur trente-deux ans) de la chute de productivité dûe à l'été caniculaire de 2003 en Europe sont par conséquent plus réalistes dans CROP et CROPi que dans NoCROP, qui simule une stabilité voire même une augmentation locale de productivité pour le PFT herbacé "pseudo-agricole" en C4. Ceci peut s'expliquer par le fait que la paramétrisation de la réponse de la photosynthèse de ce PFT à la température est adaptée aux zones tropicales, aire théorique de croissance de ce type de plantes. Les fortes températures estivales en 2003 favorisent ainsi ce PFT dans la simulation sans STICS. A l'inverse, pour le PFT herbacé "pseudo-agricole" en C3, c'est une réduction de la productivité que simule ORCHIDEE seul. Celle-ci est dûe au cycle saisonnier long qui expose l'herbacée aux conditions extrêmes de l'été alors que les cultures d'hiver qui remplacent une partie de ces herbacées en C3 dans ORCHIDEE-STICS les esquivent partiellement. La distribution spatiale et l'intensité de la chute de productivité dûe à la sécheresse de 1976 en Europe, observées dans les données FAO et EUROSTAT, sont également mieux reproduites par ORCHIDEE-STICS que par ORCHIDEE seul.

L'été 2003 mérite le qualificatif de canicule (centrée sur la Bourgogne et le pourtour des Alpes) étant donné l'excès de $+6^{\circ}C$ des températures de Juin à Août par rapport aux moyennes saisonnières. L'année 1976 mérite plutôt celui de sécheresse (centrée le Nord-Ouest de la France), les précipitations cumulées de Janvier à Août étant de -400mm inférieures (soit 60%) à la moyenne. Au sein des cultures simulées par ORCHIDEE-STICS, le type en C3 d'hiver a moins souffert de ces conditions extrêmes que les cultures de printemps du fait de son cycle précoce. On a cherché à interpréter sur trois régions (Nord de la France, Nord-Ouest de l'Allemagne et Plaine du Pô) les mécanismes ayant causé la chute de productivité simulée pour les cultures.

On a trouvé que la moindre NPP (cumulée sur l'année) est dûe à une réduction de l'efficience d'utilisation de l'eau transpirée et de l'efficience d'assimilation du CO₂ prélevé dans l'atmosphère. Cette quantité prélévée (GPP) a diminué de $\approx 30\%$ mais la transpiration et la respiration autotrophe ont augmenté en relatif (bien qu'ayant diminué en absolu en raison de la surface réduite de feuilles et de la biomasse réduite). L'assimilation aurait été réduite à cause des fortes températures estivales supérieures à l'optimum pour la photosynthèse, du raccourcissement de la saison de croissance et de la diminution du LAI maximum. A l'échelle d'un stomate, on suppose que les flux d'eau et de CO₂ ont été découplés par l'effet du stress thermique plus que du stress hydrique ou azoté. L'irrigation calculée automatiquement a augmenté de +200mm pour le maïs en 1976 et 2003 en réponse à la demande climatique. Son rôle a été plus important en 1976 qu'en 2003 : elle a atténué le stress hydrique et la perte d'efficience d'utilisation de l'eau alors qu'en 2003 la productivité est réduite même en conditions irriguées. Contrairement au cas des cultures, Ciais *et al.* [2005] notent que la réduction d'efficience d'utilisation de l'eau par les arbres mesurée entre 2003 et 2002 n'a été que très légère.

L'évaluation de la productivité moyenne des cultures s'est basée sur de nombreuses approximations, notamment dans les coefficients utilisés pour convertir les rendements en NPP et dans la définition des catégories de cultures. Cette étude devrait être affinée. L'analyse de la variabilité inter-annuelle effectuée sur les pays principaux de notre zone d'étude devrait être étendue à l'ensemble de la zone. Les corrélations spatiales et temporelles des anomalies de la productivité avec celles des variables température, précipitations et rayonnement devraient être calculées.
Chapitre 4

Anomalie de flux net de carbone en 2003 en Europe

Sommaire

4.1 Mét	bodes d'estimations du flux net de carbone		
4.1.1	Approche directe ou "Bottom-up"		
4.1.2	Approche inverse ou "Top-down"		
4.2 Comparaison des NEE d'ORCHIDEE-STICS aux deux inversions			
glob	oales		
4.2.1	Détection d'une source anormale de carbone en Europe en 2003 184		
4.2.2	Développement temporel de l'anomalie européenne		
4.2.3	Structure spatiale de l'anomalie saisonnière		
4.2.4	Limites aux apports de l'approche inverse		
4.3 Contribution des flux bruts à la NEE simulée			
4.3.1	Evolution saisonnière de la NPP et de la respiration hétérotrophe 195		
4.3.2	Distribution spatiale de la NPP et de la Rh		
4.3.3	Bilan des effets de l'été 2003 et de la prise en compte de l'agriculture		
	sur les flux de carbone \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 201		
4.3.4	Discussion		
Synthèse sur les flux de carbone européens en 2003 206			

Ce chapitre vient en complément des parties I.C et II.C de l'article à soumettre à *Global Bio-geochemical Cycles* sur l'évaluation d'ORCHIDEE-STICS à diverses échelles de temps et d'espace. C'est à l'échelle de l'Europe et de la saison de croissance qu'on comparé les flux nets de carbone¹ simulés par ORCHIDEE-STICS, et la version d'ORCHIDEE sans agriculture, aux estimations obtenues par deux méthodes dites "inverses".

La comparaison des simulations du modèle d'écosystème aux estimations inverses a été envisagée pour pallier le manque d'une mesure des flux de carbone intégrée régionalement. En effet les modèles de processus décrivant le fonctionnement de la biosphère, tels ORCHIDEE, permettent de simuler les bilans de carbone pour une grande diversité d'échelles spatiales et temporelles : du local au global et pour des variations horaires à inter-annuelles. Cependant les mesures directes des bilans et surtout des flux de carbone ne concernent que les petites échelles : de la feuille à la plante ainsi que l'échelle locale (un écosystème particulier) grâce aux mesures par corrélation turbulente (tour de flux). Aux échelles supérieures (*i.e.*, du régional au continental) seules des estimations indirectes des flux de carbone sont possibles. Celles-ci sont généralement réalisées en intégrant différentes mesures à l'aide d'un modèle numérique. Les approches atmosphériques combinent des mesures de concentration en CO_2 (et/ou autres traceurs) avec un modèle de transport atmosphérique (inversion atmosphérique). D'autres approches intègrent les mesures de flux en divers sites grâce à des données de télédétection. Tandis que les mesures de biomasses comme les inventaires forestiers renseignent directement sur les flux pour de longues périodes temporelles.

J'ai utilisé dans ce travail les résultats de deux approches inverses récentes fournissant une estimation spatialisée des flux de carbone mensuels. La concordance entre simulations avec agriculture et inversions à l'échelle de l'Europe et de la saison de croissance (résultat présenté en partie II.C.4 de l'article Smith *et al.* [soumis]) a permis

- de quantifier la source anormale de carbone émise par la biosphère européenne entre Mai et Octobre 2003 ($\approx 0.2GtC$ sur la fenêtre d'étude),
- de conclure que l'introduction d'une représentation de l'agriculture permet bien une amélioration de la simulation de cette anomalie, et
- d'interpréter la distribution temporelle et spatiale de l'anomalie simulée, pour comprendre les processus à l'origine de la réduction de cette anomalie lors du remplacement des herbacées originelles par des surfaces agricoles plus réalistes.

Les résultats et discussions présentés dans la partie concernée de l'article ne ne seront qu'en partie repris dans ce chapitre, qui est envisagé comme un approfondissement de l'analyse :

• La partie 4.1 présente d'une part la modélisation des flux bruts spatialement hétérogènes de la biosphère (sous-partie 4.1.1) et d'autre part, la reconstruction de sources et puits de CO_2 par transport atmosphérique inversé et optimisation par rapport aux mesures de la concentration atmosphérique en CO_2 (sous-partie 4.1.2).

• La partie 4.2 confronte, dans le cadre particulier de l'étude de l'anomalie de flux et de concentration atmosphérique en CO_2 observée en 2003 en Europe (sous-partie 4.2.1), les distributions temporelle (sous-partie 4.2.2) et spatiale (sous-partie 4.2.3) de l'anomalie de NEE obtenue par les deux approches. Il s'agit en quelque sorte de l'évaluation de l'amélioration supposée des flux nets de carbone échangés entre la biosphère et l'atmosphère simulés par le modèle incorporant une représentation des surfaces cultivées. La tentative de détermination de la meilleure échelle pour effectuer cette évaluation débouche sur une discussion des limites des inversions (sous-partie 4.2.4) pour l'interprétation des changements de NEE des écosystèmes terrestres.

¹Par la suite, on utilisera le sigle NEE en référence à la NEP ou NBP (vues au chapitre 1, partie 1.2.2.3), vue par l'atmosphère. D'après la convention atmosphérique, les flux de carbone de la biosphère vers l'atmosphère sont comptés positivement. Dans notre étude, la NPP correspond à un flux négatif et la respiration à un flux positif.

Caractéristiques	Inversion LSCE Peylin <i>et al.</i> [2005]	Inversion JENA Rödenbeck <i>et al.</i> [2003]	
Modèle de transport	$LMDz : 2.5^{o} \times 3.75^{o} \times 19$ niveaux	$TM3: 4^o \times 5^o \times 19$ niveaux	
	Vents inter-annuels		
Résolution des flux	Mensuelle \times maille de LMDz	Hebdomadaire \times maille de TM3	
Observations	$\approx 70 \text{ sites}$		
Observations	Moyennes mensuelles	Mesures hebdomadaires flacons	
Flux a priori	Modèle de biosphère (ORCHIDEE)	Modèle mathématique simple	
(biognhárique)	+ estimations de combustion de bio-		
(biospherique)	masse [Van Der Werf et al., 2003]		
Erreur a priori	basée sur la NPP des mailles		
(flux biosphérique)	+ corrélation entre les erreurs, basée sur la distance entre mailles		

TAB. 4.1 – Tableau récapitulatif des différences entre conditions de réalisation des inversions LSCE et JENA.

• La partie 4.3 décompose la NEE simulée en NPP et respiration hétérotrophe. On en analyse l'évolution saisonnière (sous-partie 4.3.1) et la distribution spatiale (sous-partie 4.3.2), en moyenne et en anomalie en 2003 par rapport à cette moyenne. Les processus déséquilibrés lors de l'été 2003 et la façon dont ils sont affectés par l'évolution d'ORCHIDEE en faveur d'une prise en compte plus réaliste de l'agriculture constituent le fil conducteur de cette partie. La sous-partie 4.3.3 dresse un bilan de ces effets.

4.1 Méthodes d'estimations du flux net de carbone

4.1.1 Approche directe ou "Bottom-up"

Les flux bruts qui composent la NEE journalière simulée par ORCHIDEE et ORCHIDEE-STICS pour chaque PFT ont été décrits au chapitre 1 (parties 1.2.2). On obtient la NEE par maille en agrégeant les NEE de tous les PFT suivant la contribution de chacun définie par la carte de végétation. C'est la même procédure qui avait été utilisée pour calculer le LAI agrégé à comparer aux indices de végétation tirés des données satellitaires (chapitre 2, partie 2.1.4.2). Dans ce chapitre, la NEE a été agrégée sur la base du scénario FEW d'attribution des fractions relatives aux 3 PFTs agricoles. Le flux de récolte *E* spécifique aux PFT agricoles d'ORCHIDEE-STICS a été décrit en partie 1.2.2.3 du chapitre 1. Par construction, dans la simulation NoCROP, les PFT pseudo-sgricoles ne subissent pas de récolte. Dans la partie II.B de l'article Smith *et al.* [soumis], on a temporairement souhaité exprimer un "rendement" à partir de la NPP annuelle simulée par ORCHIDEE pour la comparaison avec les données FAO. Cependant, ce "rendement" n'influence pas le bilan de carbone qui considère que toute la productivité des herbacées pseudoagricoles est transférée à la litière. Les simulations CROP, CROPi et NoCROP analysées dans ce chapitre sont celles qui ont été initialisées à partir d'une simulation de mise à l'équilibre décrite en partie 1.3.5.

4.1.2 Approche inverse ou "Top-down"

Les estimations inverses consistent en une utilisation indirecte des modèles de transport atmosphérique pour reconstituer la distribution spatiale et temporelle des flux nets de carbone à la surface. Dans un premier temps, des simulations directes sont effectuées avec un modèle de circulation générale, à partir de sources et puits de carbone *a priori*, pour reproduire les



FIG. 4.1 – Schéma descriptif de la méthode inverse.

concentrations en CO_2 observées. Ce jeu de flux *a priori* comprend une estimation des émissions fossiles, des flux biosphériques (issue d'un modèle) et des flux océaniques [Takahashi *et al.*, 2002]. Une optimisation sous contraintes est ensuite réalisée pour corriger les flux *a priori* liés à la biosphère et à l'océan (les flux fossiles restent fixes) [Enting *et al.*, 1993; Tarantola, 1987]. De ces inversions, dont le principe est résumé par la figure 4.1, résulte une distribution des flux de CO_2 optimale,

- qui minimise la distance entre les concentrations simulées et observées dans l'atmosphère
- et ne s'écartent pas trop des informations *a priori* (*i.e.* contrainte caractérisée par une erreur *a priori* sur ces flux.

Cette approche dite « Bayésienne » est formulée dans un contexte probabiliste et correspond à la minimisation d'une fonction de coût.

J'ai utilisé deux jeux d'inversions indépendantes à "haute-résolution" spatiale sur la période 1996-2003 Elles résultent des travaux de Peylin *et al.* [2005] et Rödenbeck *et al.* [2003], complétés d'améliorations récentes en cours de publication. Par la suite on utilisera respectivement les termes "LSCE" et "JENA" pour faire référence à ces deux inversions. Celles-ci sont basées sur une approche relativement nouvelle permettant d'optimiser les flux à l'échelle de la grille du modèle de transport atmosphérique par opposition aux inversions « grandes régions » utilisées principalement. Cette approche permet de s'affranchir en partie de la distribution spatiale *a priori* des flux de CO_2 (erreur d'agrégation, Kaminski *et al.* [2001]). Néanmoins le problème inverse devient alors fortement sous-contraint (moins de 100 observations pour quelques milliers de flux) et nécessite l'utilisation de corrélations entre les erreurs sur les flux *a priori* pour propager spatialement l'information des différents sites de mesures atmosphériques. Pour ces deux inversions, les corrélations imposées décroissent exponentiellement selon la distance entre les mailles.



FIG. 4.2 – Exemple de mesures de concentration en CO_2 atmosphérique (ppm) dans quatre stations du réseau CarboEurope, sur une période incluant l'été extrêmement chaud et sec de l'année 2003, marqué par un cercle bleu. Les quatre stations peuvent être localisées sur la carte de la figure 4.1

Dans le cas de l'inversion LSCE, les flux nets biosphériques de carbone a priori sont fournis par la simulation NoCROP (ORCHIDEE sans agriculture) et les marges de correction autorisées sont proportionnelles à sa NPP (Tab. 4.1). L'erreur prescrite est de l'ordre de 4.5GtC/an pour toute la biosphère, répartie en 2.5GtC/an pour l'Eurasie, l'Afrique et l'Australie et 2GtC/anpour l'Amérique du Nord et du Sud. Dans le cas de l'inversion JENA, c'est une approche plus conceptuelle basée sur une séparation en fréquences des flux biosphériques qui sert de support a priori. Cette approche rend les estimations de flux par l'inversion JENA temporellement plus lisse. L'inversions LSCE résout les flux mois par mois sans corrélation temporelle des erreurs. Ainsi les flux bruts obtenus présentent des oscillations fortes d'un mois sur l'autre.

L'exactitude des inversions globales est limitée par la faible densité du réseau atmosphérique et par les biais inconnus des modèles de transport [Gurney *et al.*, 2002]. Les deux approches inverses convergent en général dans le cas d'années extrèmes et leurs estimations d'anomalies inter-annuelles de flux sont plus robustes que leurs estimations de flux moyens annuels ou pour une période donnée [Baker *et al.*, 2006; Bousquet *et al.*, 2000]. La résolution spatiale à laquelle les flux de CO_2 sont estimés par ces deux inversions, *i.e.* celle des modèles de transport atmosphérique (Tab. 4.1), est plus grossière que celle des simulations d'ORCHIDEE. De plus à l'échelle de la grille du modèle, les flux inversés sont entachés d'une forte incertitude et celle-ci diminue sensiblement lorsqu'on agrège spatialement ces estimations. Les flux provenant des forêts, des prairies et des surfaces cultivées ne peuvent être distingués. Ainsi, pour comparer la NEE simulée aux inversions, nous l'avons agrégée sur les différents PFT. Etant donnée la surface occupée par les cultures en Europe, le fait de prendre en compte leur fonctionnement propre (phénologie, irrigation...) dans ORCHIDEE devrait induire des différences de flux suffisamment importantes, que l'on espère supérieures au bruit des inversions.



FIG. 4.3 – Anomalies de NEE (GtC, convention atmosphérique) cumulées sur l'Europe et la saison Mai-Octobre comparées sur la période 1996-2003 entre les simulations basées sur ORCHI-DEE : NoCROP (vert), CROP (rouge) et CROPi (bleu), et les deux estimations inverses LSCE (noir) et JENA (gris).

4.2 Comparaison des NEE d'ORCHIDEE-STICS aux deux inversions globales

4.2.1 Détection d'une source anormale de carbone en Europe en 2003

La figure 4.2 montre deux ans d'évolution de la concentration atmosphérique en CO_2 enregistrée dans quatre stations de mesures européennes. Ces quatre stations peuvent être localisées sur la carte du réseau CarboEurope présentée en figure 4.1. Les données présentent, outre un cycle saisonnier marque, des valeurs estivales (Juillet-Août-Septembre) plus élevées en 2003 qu'en 2002, signalées par les cercles bleus sur la figure. Cette anomalie de concentration est présente sur tous les sites européens avec une amplitude variable et relativement peu visible sur les autres sites de l'hémisphère Nord. Elle reflète donc une source anormale durant cette période sur l'Europe ou les régions voisines. L'approche inverse permet de transcrire cette anomalie de concentration en une anomalie de flux.

Aussi bien les simulations NoCROP et CROP que les inversions font apparaître l'année 2003 comme une année exceptionnelle par rapport au reste de la décennie (Fig. 4.3). L'atmosphère au dessus des surfaces européennes a été anormalement enrichie en CO₂ entre les Mai et Octobre (de ≈ 0.2 à $\approx 0.4GtC$ selon les estimations) en comparaison à la moyenne 1996-2002. L'année 2003 est (avec 1996, Mais dont l'anomalie, de signe opposé, est plus limitée) la seule année pour laquelle les inversions et les simulations directes estiment une anomalie de même signe. La restriction à la saison de Mai à Octobre a été choisie car elle comprend la majeure partie de la saison de croissance et inclut les deux épisodes de chaleur extrême observés dans les données climatiques (Juin et Août). L'estimation de la source européenne anormale de carbone en 2003 par la simulation NoCROP est deux fois plus élevée qu'avec les simulations CROP et CROPi. Ces dernières produisent des valeurs proches des estimations inverses (partie II.C.4 de l'article Smith *et al.* [soumis]). Notons néanmoins que les estimations inverses présentent de fortes divergences (y compris de signe) sur la période 1997-2002 et que seule la forte anomalie 2003 montre un très bon accord. Afin de comprendre l'origine de ces valeurs et de leurs écarts, intéressons-nous aux caractéristiques spatio-temporelles variables de l'anomalie européenne de NEE en 2003 selon les approches.

4.2.2 Développement temporel de l'anomalie européenne

Dans les analyses qui suivent (Fig. 4.4 et partie 4.3.1) où on illustre les cycles saisonniers ou cartes, en moyenne sur 1996-2002 ou pour l'année particulière 2003, une normalisation a été réalisée sur les variables absolues². On a fait l'hypothèse que la NBP (ici équivalente à la NEE) d'un écosystème à l'équilibre tend vers zéro en moyenne sur une longue période (plusieurs dizaines d'années). Or les trois simulations avec le modèle d'écosystème présentent un biais négatif (puits de carbone) qui est dû au fait que la mise à l'équilibre n'a pas été complète et exacte pour chaque simulation. A ce stade, la respiration des produits agricoles récoltés n'était pas été intégrée à la respiration de l'écosystème (flux de récolte E évoqué au chapitre 1 en partie 1.2.2.3). La normalisation de la NEE (série 1996-2003) a permis de corriger ces biais dans chaque simulation en ajoutant au terme de respiration une valeur constante à chaque pas de temps, soustraite de la NEE afin d'équilibrer cette dernière sur la période 1996-2002. Notons que la position relative de l'année 2003 par rapport à la moyenne reste ainsi inchangée. On a normalisé ces flux indépendamment pour chaque maille et pour chaque groupe de PFT (naturels et agricoles) par maille. Pour les inversions, on a aussi retiré la valeur moyenne 1996-2002 de la série de NEE 1996-2003. Cette normalisation nous affranchit du puits net de carbone, grandeur très peu robuste à l'échelle considérée (cf. partie 4.1.2).

Pour les simulations directes, cette normalisation suppose le biais constaté est constant dans le temps (pas de variabilité saisonnière ni inter-annuelle), ce qui est probablement inexact. En effet le terme de respiration manquant dans les simulations CROP et CROPi (biomasse récoltée) dépend fortement de l'utilisation des ressources agricoles (stockage, consommation par les animaux, commerce) et est donc probablement variable. La mise à l'équilibre partielle (une seule simulation longue pour initialiser les trois simulations NoCROP, CROP et CROPi) implique aussi un terme de respiration manquant dans la simulation NoCROP. Le contenu en carbone du sol est en effet sous-estimé car celui-ci aurait dû être alimenté par l'ensemble de la biomass (et non pas seulement la partie non récoltée). Ce terme manquant de respiration varie selon les conditions d'humidité et la température. Cependant, cette correction relativement faible ne modifiera pas le premier ordre de nos interprétations.

Rappelons pour finir qu'un masque terre-océan à résolution de $0.5^o \times 0.5^o$ permet de ne tenir compte, dans l'agrégation des flux calculés par m^2 par ORCHIDEE, que des fractions de pixel réellement contributrices au flux européen (*i.e.* mer et glaciers alpins exclus). Dans le cas des flux inverses, l'ensemble des surfaces auxquelles a été attribué un flux de carbone d'origine terrestre a été considéré, une maille étant à 100% terrestre ou marine.

En moyenne (1996-2002, trait pointillé), le cycle saisonnier de la NEE cumulée sur l'Europe (Fig. 4.4a.) est dans les inversions de même amplitude que celui simulé par ORCHIDEE et ORCHIDEE-STICS (Fig. 4.4b., aussi en partie II.C.2 de l'article Smith *et al.* [soumis]). Le puits maximum simulé pendant la saison de croissance est estimé à $\approx -6TgC/jour$ (-180TgC/mois) et la source maximum hivernale à $\approx +4TgC/jour$ (+120TgC/mois) à la fois dans les inversions LSCE et JENA. La période d'absorption nette du CO₂ (où l'assimilation par photosynthèse est dominante sur la respiration totale de l'écosystème) débute fin Mars dans l'inversion LSCE et environ 3 semaines plus tard (mi-Avril) dans celle de JENA. Un décalage similaire (environ 2 semaines) dans la fin de cette phase de puits net apparaît aussi entre l'inversion LSCE (fin Août) et l'inversion JENA (début Septembre). Le cycle de la NEE estimé par l'approche LSCE

 $^{^2 {\}rm Cette}$ normalisation n'a pas d'effet sur les anomalies calculées par différence entre 2003 et la moyenne 1996-2002.



b. Simulations



FIG. 4.4 – Cycle saisonnier normalisé de la NEE (TgC/jour, convention atmosphérique) cumulée sur l'Europe en moyenne sur 1996-2002 (trait pointillé) et en 2003 (trait plein), estimée **a.** par les inversions LSCE (noir) et JENA (gris), et simulée **b.** dans les expériences NoCROP (vert), CROP (rouge) et CROPi (bleu) (moyenne glissante sur 30 jours).



b. Simulations



FIG. 4.5 – Cycle saisonnier de l'anomalie 2003 de NEE (TgC/jour, convention atmosphérique) cumulée sur l'Europe estimée **a**. par les inversions LSCE (noir) et JENA (gris), et simulée **b**. dans les expériences NoCROP (vert), CROP (rouge) et CROPi (bleu) (moyenne glissante sur 30 jours).

est donc dans l'ensemble légèrement plus en avance que celui estimé par l'approche JENA, ce qui se retrouve dans le léger décalage temporel dans le maximum d'absorption nette (respectivement mi-Juin et fin Juin). Ces cycles de NEE moyens obtenus par inversion atmosphérique (Fig. 4.4a.) restent plus tardifs que ceux simulés par les versions CROP, CROPi et NoCROP du modèle d'écosystèmes terrestres (Fig. 4.4b.), où cette même phase débute fin mars, est à son maximum fin Mai et se termine fin juillet (NoCROP) à fin août (CROPi).

En 2003 (trait plein), l'amplitude du cycle de la NEE européenne est réduite de façon similaire dans les trois simulations directes (Fig. 4.4b.) et les deux inverses (Fig. 4.4a.). Le pic estival d'absorption nette de CO₂ diminue de $\approx -6TgC/jour$ (-180TgC/mois) à $\approx -4, 5TgC/jour$ (-135TgC/mois), soit 25%, dans les cinq simulations. De plus, ce pic est légèrement avancé dans le temps. Parallèlement, la fin de la période d'absorption nette du CO₂ par les écosystèmes est anticipée d'un mois dans l'inversion JENA (15 jours dans l'inversion LSCE) et d'un mois dans la simulation NoCROP à un mois et demi dans les simulations CROP et CROPi. La saison de croissance est raccourcie à cause de la sénescence accélérée des plantes en fin de cycle, suite aux conditions caniculaires qui ont sévi durant la période Juin-Août sur une grande partie de l'Europe. L'absorption nette de CO₂ atmosphérique est réduite en 2003 principalement de par l'effet négatif des températures excessives de l'été sur la productivité des végétaux. Cette source anormale de carbone vers l'atmosphère (valeur positive), cumulée de Mai à Octobre, est comparée entre les simulations directes et les estimations inverses (Fig. 4.3, aussi en partie II.C.4 de l'article).

L'anomalie européenne est exprimée selon la difference mensuelle (ou journalière) ci-dessous :

$$NEE_{anom}(t) = \sum_{i}^{Europe} NEE_{2003}(t,i) - \sum_{i}^{Europe} NEE_{moy1996-2002}(t,i)$$
(4.1)

où t est le pas de temps et i la maille.

Le cycle de cette anomalie européenne est illustré en figure 4.5**a.** pour les deux inversions et en figure 4.5**b.** (aussi en partie II.C.2 de l'article Smith *et al.* [soumis]) pour les 3 simulations directes. Les inversions LSCE et JENA s'accordent sur le fait que le comportement anormal des flux biosphériques prend fin en Octobre, ce qui est aussi le cas d'après les simulations CROP et CROPi contrairement à la simulation NoCROP, qui néglige l'influence des cultures. Cependant, les inversions montrent une apparition de l'anomalie avec deux mois d'écart : elle débute en mars pour l'anomalie LSCE et en Mai pour celle de JENA. Le démarrage de l'anomalie dans les trois simulations directes se fait entre les deux, en avril. Le maximum de l'anomalie reste centré sur juillet-août dans les deux inversions ($\approx +2, 5TgC/jour, +75TgC/mois$), alors qu'il est simulé en juin dans les simulations CROP et CROPi ($\approx +3TgC/jour, +90TgC/mois$) et de façon persistante jusqu'en août dans la simulation NoCROP ($\approx +3, 5TgC/jour, +105TgC/mois$).

La structure en deux pics est spécifique aux simulations d'ORCHIDEE avec agriculture. Le fait que cette structure n'apparaisse pas dans les inversions traduit probablement une des limites de cette approche lorsque l'on considère des échelles spatio-temporelles fines. En effet l'aspect plus lisse du cycle de l'anomalie de NEE estimée par inversion (surtout pour l'approche JENA) provient des contraintes utilisées pour compenser le manque d'information lié à la faible densité du réseau de stations de mesures de CO₂ atmosphérique. Ces mesures ne permettent pas de corriger suffisamment la structure spatio-temporelles des flux *a priori*, qui ne tient pas compte de l'agriculture. La différence significative de développement temporel entre les deux estimations inverses reflète principalement des choix de régularisation du problème inverse très différents : lissage temporel fort dans le cas JENA (supérieur au mois) vs. flux mensuels indépendants dans le cas LSCE. Ainsi, l'incertitude significative dont est entâché le cycle saisonnier de l'anomalie de NEE inversée ne permet pas de valider directement l'amélioration du cycle simulé par ORCHIDEE en intégrant la représentation de l'agriculture. Cependant, le cumul de l'anomalie

de NEE entre les mois de Mai et Octobre (inclus) entraîne la compensation de la plus faible amplitude des anomalies des inversions par la structure en deux pics des anomalies simulées par ORCHIDEE-STICS. Il permet aussi la compensation des différences entre les deux inversions. Tout ceci suggère que les estimations inverses ne sont pour l'instant fiables qu'à une échelle intégrée sur la saison de croissance.

4.2.3 Structure spatiale de l'anomalie saisonnière

La figure 4.6a (resp. 4.6b montre l'anomalie de NEE estimée par l'inverion LSCE (resp. JENA) cumulée de Mai à Octobre, cette fois par unité de surface, dans une tentative de décomposer la source de carbone en 2003 en régions plus ou moins contributrices.

L'anomalie saisonnière est exprimée selon la difference ci-dessous :

$$NEE_{anom}(i) = \sum_{t}^{saison} NEE_{2003}(t,i) - \sum_{t}^{saison} NEE_{moy1996-2002}(t,i)$$
(4.2)

où on rappelle que t est le pas de temps et i la maille.

L'inversion LSCE montre une source anormale de presque $+300gC/m^2$ au Nord-Est de la fenêtre considérée durant l''été" 2003 (Mai-Octobre). L'anomalie présente un dipôle où l'Espagne apparaît comme un léger puits anormal de carbone durant cette période (moins de $-100gC/m^2$). Ce dipôle est dû en partie aux flux *a priori* qui possèdent déjà cette structure spatiale. L'inversion JENA ne présente pas de dipôle entre ces deux régions et l'anomalie positive de NEE de l'été 2003 (presque $+200gC/m^2$) est centrée sur le Nord de la France. Dans les deux cas, le pattern régional ne correspond pas précisément à celui, centré autour de l'arc alpin (Fig. 4.7**a**., 4.7**b**. et 4.7**c**. partie II.C.3 de l'article Smith *et al.* [soumis]), qui a été simulé dans les trois expériences avec le modèle d'écosystème terrestre. Or ce dernier (pattern) semble plus réaliste car il correspond bien aux signaux anormaux de température de l'air (moyenne Juin-Août) et de précipitation (cumul Janvier-Juillet) détectés dans le forçage climatique (partie II.B.4 de l'article Smith *et al.* [soumis]).

Les valeurs de l'anomalie simulées par le modèle d'écosystème sont localement plus élevées que celles estimées par inversion. Elles atteignent $+400qC/m^2$ dans les simulations CROP et CROPi (Fig. 4.7b. et 4.7c.) et $+700gC/m^2$ dans la simulation NoCROP (Fig. 4.7a.). Les plus faibles valeurs inverses (Fig. 4.6a.-b.) s'expliquent par la résolution spatiale plus grossière des inversions (3° en longitude $\times 4^{\circ}$ en latitude pour celle du LSCE). La taille des mailles du modèle de transport atmosphérique fait que les valeurs de NEE obtenues représentent l'équivalent d'une moyenne de 48 mailles d'ORCHIDEE. Les valeurs encore plus faibles obtenues par JENA (Fig. 4.6b.) combinent aussi la faible résolution du masque terre-océan qui ne distingue pas la Méditerranéee. La plus grande surface englobée disperse plus les flux de carbone terrestres. Même si l'anomalie de NEE simulée avec ORCHIDEE sans agriculture (Fig. 4.7a.) est plus élevée que celle simulée par ORCHIDEE-STICS ou dans les inversions, c'est à l'échelle intégrée sur l'Europe qu'elle peut être "évaluée" par comparaison aux inversions. Le pattern spatial n'est pas directement interprétable dans l'état actuel des inversions. Celles-ci sont encore très dépendantes des contraintes appliquées pour l'optimisation des flux par rapport à l'information contenue dans les mesures atmosphériques. Le positionnement géographique précis du centre de la source anormale de carbone en 2003 d'après les inversions reste trop incertain pour apporter une contrainte forte aux simulations directes. Ce positionnement dépend aussi de la précision du transport atmosphérique dans chacun des deux modèles de l'approche inverse. Si l'on considère l'ensemble de l'hémisphère Nord on constate un relatif accord dans le nombre d'anomalies régionales simulées mais leur positionnement exact et leur extension spatiale varient selon les inversions.



FIG. 4.6 – Structure spatiale de l'anomalie 2003 de NEE (gC/m^2) , convention atmosphérique) cumulée sur la saison Mai-Octobre, estimée **a.** par l'inversion LSCE et **b.** par l'inversion JENA. **c.** Structure spatiale de la différence entre les anomalies estimées par les deux inversions. La couleur rouge indique un flux positif vers l'atmosphère (source) et la couleur verte un flux négatif (puits).

4.2.4 Limites aux apports de l'approche inverse

La figure 4.6c. affiche la différence entre les deux cartes représentant l'anomalie de 2003 de NEE (cumul Mai-Octobre) obtenue respectivement par l'inversion JENA (Fig. 4.6b.) et LSCE (Fig. 4.6a.). Notons que les mailles concernées par cette différence (JENA - LSCE) sont celles appartenant au masque terre-océan de l'inversion LSCE, le plus restrictif. Cette carte de différence ignore dans un premier temps les compensations temporelles de différences entre les deux estimations s'opérant de Mai à Octobre. L'anomalie de NEE estimée par l'inversion JENA est de près de $200qC/m^2$ supérieure, sur l'Ouest de la France, à celle estimée par LSCE, tandis qu'elle est de $300qC/m^2$ inférieure sur la République Tchèque et les Balkans. On retrouve ainsi la différence de localisation du centre de l'anomalie entre les deux inversions qui induit un dipôle. En revanche la différence entre les deux inversions soit faible sur l'Allemagne, la Suisse, l'Autriche et l'Italie. Ces pays de l'arc alpin sont ceux où les zones de source anormale de carbone en 2003 détectées par inversion se recouvrent et où les signaux anormaux de température et de précipitation sont les plus forts (Fig. 4.7a., 4.7b. et 4.7c. et partie II.C.3 de l'article Smith et al. [soumis]). Cependant on ne peut pas considérer que les inversions sont robustes pour ces pays. Une analyse détaillée des erreurs associées aux flux de chaque maille sur ces régions, en liaison avec la position des stations atmosphériques, serait nécessaire pour aller plus loin. Ce travail n'est pas l'objet de cette thèse.

Les figures 4.8a. et 4.8b. montrent l'effet de la prise en compte des surfaces agricoles dans ORCHIDEE et de l'irrigation de ces surfaces sur la simulation de l'anomalie de NEE en 2003 (cumul Mai-Octobre). Elles correspondent respectivement aux différences entre les cartes présentées en figure 4.7b. et 4.7a. (CROP - NoCROP) et les cartes présentées en figure 4.7c. et 4.7b. (CROPi - CROP). La figure 4.8c. montre la combinaison des deux effets (CROPi - NocROP). On retrouve les résultats commentés en partie II.C.3 de l'article Smith *et al.* [soumis] à savoir : la réduction ($\approx -300gC/m^2$) de l'anomalie 2003 de NEE simulée par le modèle d'écosystème, principalement dans le quart Nord-Est de notre fenêtre européenne, suite à l'introduction de PFT agricoles plus réalistes (Fig. 4.8a.) et la réduction additionnelle (\approx -300gC/m²) plus locale apportée par l'irrigation en Pologne (Fig. 4.8b.).

Si l'on cumule sur l'Europe ces différences en ignorant les compensations spatiales de différences positives et négatives, on obtient les bâtons de couleur pleine sur la figure 4.9 (DaC, différence absolue des cumuls).

Ceci revient à calculer :

$$DaC_{CROPi-NoCROP} = |\sum_{i}^{Europe \ saison} \sum_{t}^{NEE_{anom,CROPi}(t,i)} - \sum_{i}^{Europe \ saison} \sum_{t}^{NEE_{anom,NoCROP}(t,i)}|$$

$$(4.3)$$

$$DaC_{JENA-LSCE} = |\sum_{i}^{Europe \ saison} NEE_{anom, JENA}(t, i) - \sum_{i}^{Europe \ saison} NEE_{anom, LSCE}(t, i)| \quad (4.4)$$

Ces valeurs correspondent aux écarts absolus entre les anomalies régionales saisonnières simulées par le modèle d'écosystème ou entre celles obtenues par inversion, illustrées sur la figure 4.3.

Au contraire, si l'on veut prendre en compte les compensations spatiales et temporelles qui entrent en jeu lorsque l'on passe de l'échelle de la maille (résolution du modèle d'écosystème ou de transport) à celle de la fenêtre européenne et de l'échelle du jour (ou du mois) à celle de la saison, on calcule d'abord point par point la différence, puis on cumule les valeurs absolues de ces différences sur l'Europe et la saison. On obtient dans ce cas les bâtons de couleur quadrillée sur la figure 4.9 (CDa, cumul des différences absolues).



FIG. 4.7 – Structure spatiale de l'anomalie 2003 de NEE $(gC/m^2, \text{ convention atmosphérique})$ cumulée sur la saison Mai-Octobre, simulée dans les expériences **a.** NoCROP, **b.** CROP et **c.** CROPi. La couleur rouge indique un flux positif vers l'atmosphère (source) et la couleur verte un flux négatif (puits).



FIG. 4.8 – Structure spatiale de la différences entre les anomalie 2003 de NEE (gC/m^2) cumulée sur la saison Mai-Octobre, simulées dans les expériences CROP et NoCROP 4.7b.-4.7a., CROPi et CROP 4.7c.-4.7b. et CROPi et NoCROP 4.7c.-4.7a. La couleur rouge indique un flux positif vers l'atmosphère (source) et la couleur verte un flux négatif (puits).



FIG. 4.9 – Cumuls sur l'Europe et la saison Mai-Octobre des différences entre les anomalies 2003 de NEE (GtC) estimées par les deux inversions JENA et LSCE (noir) et simulées dans les expériences CROP et NoCROP (rouge), CROPi et CROP (bleu) et CROPi et NoCROP (vert). Les différences absolues **b.** ou pas **a.** ont été calculées à la résolution propre à chacune des deux approches (inverse et directe).

$$CDa_{CROPi-NoCROP} = \sum_{i}^{Europe \ saison} \sum_{t} |anomNEE_{CROPi}(t,i) - anomNEE_{NoCROP}(t,i)| \quad (4.5)$$

$$CDa_{JENA-LSCE} = \sum_{i}^{Europe \ saison} \sum_{t} |anomNEE_{JENA}(t,i) - anomNEE_{LSCE}(t,i)|$$
(4.6)

Les compensations entre différences d'anomalie locales journalières (ou mensuelles) étant importantes, un deuxième axe des ordonnées a été introduit pour illustrer sur le même graphique les différences absolues des cumuls (DaC, 0-1 GtC) et les cumuls des différences absolues (CDa, 0-15 GtC).

Les différences absolues (dont le cumul donne le bâton noir quadrillé) d'anomalies entre les inversions sont amplifiées par le fait que les masques terre-océan sont différents entre les approches LSCE et JENA. Rappelons que les valeurs de l'anomalie 2003 (Mai-Octobre) exprimées par unité de surface sont plus faibles dans l'inversion JENA car dispersées sur une plus grande surface. Le résultat du cumul dépend de la résolution spatiale. Ainsi, le cumul des différences absolues d'anomalie entre les simulations directes (bâtons rouge, bleu et vert quadrillés) serait diminué si on avait calculé les différences sur les mailles (resp. pas de temps) des inversions, *i.e.* $3^{o} \times 4^{o}$ (resp. 1 mois). En effet les différences d'anomalie simulées journalièrement et par maille de $0.5^{o} \times 0.5^{o}$ peuvent se compenser aussi à l'intérieur d'une maille et d'un mois. Ces constatations ne modifient pas le sens du résultat synthétique présenté en figure 4.9 :

• Les anomalies de NEE obtenues par les deux approches inverses sont très différentes entre elles à échelle fine. Leur écart cumulé (\approx 13 GtC) est trois fois supérieur à l'écart cumulé

entre les différentes versions d'ORCHIDEE (≈ 4.4 GtC, à échelle spatio-temporelle encore plus fine). Ce diagnostic confirme la conclusion précédente sur l'impossibilité de valider les simulations directes par comparaison aux inversions à cette échelle fine.

- En revanche, les estimations inverses sont plus semblables à l'échelle européenne et saisonnière, leur écart (≈ 0.07GtC) est trois fois inférieur à celui entre les différentes versions d'ORCHIDEE (≈ 0.21GtC, à cette même échelle régionale). Les compensations spatiales et temporelles des différences entre estimations de l'anomalie de NEE de l"'été" 2003 (Mai-Octobre) réduisent ainsi d'un facteur 20 l'écart entre simulations directes et d'un facteur 200 l'écart entre inversions à l'échelle du continent européen.
- L'irrigation contribue à hauteur d'un quart à la réduction de l'anomalie régionale saisonnière suite à l'introduction de PFT agricoles plus réalistes (visible sur les deux diagnostics).
- L'effet net du passage du modèle d'une version sans agriculture à une version avec agriculture irriguée est légèrement inférieur à la somme de l'effet d'introduire l'agriculture et de l'effet de son irrigation. On a vu (Fig. 4.5b.) (partie II.C.2 de l'article Smith *et al.* [soumis]) que l'irrigation peut temporairement augmenter l'anomalie par rapport à la simulation sans irrigation.

On poursuivra, sans les inversions, avec l'analyse des composantes de la NEE qu'elles ne permettent pas de distinguer. Il s'agit de la NPP et de la respiration hétérotrophe (Rh).

4.3 Contribution des flux bruts à la NEE simulée

Au préalable, nous avons analysé la distribution temporelle et spatiale de l'anomalie simulée, pour comprendre les processus à l'origine de la réduction de cette anomalie lors du remplacement des herbacées originelles par des surfaces agricoles plus réalistes.

4.3.1 Evolution saisonnière de la NPP et de la respiration hétérotrophe

Le flux net de carbone échangé entre la biosphère et l'atmosphère, simulé par ORCHIDEE avec et sans représentation de l'agriculture, résulte de la différence entre la NPP et la Rh. Ces deux composantes comprennent chacune la contribution des PFT naturels et celle des PFT agricoles. En moyenne sur l'Europe, d'après la carte de végétation utilisée en entrée du modèle (*cf.* chapitre 1, partie 1.3.3, Fig. 1.7), l'ensemble des PFT agricoles représente 40% du territoire et l'ensemble des PFT naturels 60%. Le cycle saisonnier de la contribution³ des PFT agricoles aux deux composantes du flux est représenté sur la figure 4.10**a**., pour les trois simulations, en moyenne sur la période 1996-2003 et au cours de l'année 2003.

L'amplitude des cycles simulés pour la Rh est plus faible que celle des cycles simulés pour la NPP. L'existence d'une respiration hivernale significative en Europe (climat tempéré) fait que ce terme est dominant dans la NEE tandis que la NPP est très faible à cette période de l'année. En revanche la saison de croissance de la végétation rend la NPP largement dominante au printemps et en été, la combinaison des cycles des deux flux donnant à la NEE son cycle caractéristique de source nette en hiver et de puits net en été. Dans la simulation NoCROP, à la fois la NPP et la Rh sont supérieures à celles des simulations CROP et CROPi en hiver. Ceci tient à ce que le sol est couvert toute l'année et que la végétation de type herbacée photosynthétise même l'hiver

³On entend ici la contribution absolue (dans la même unité que la variable intégrée) et non pas relative (usuellement exprimée en pourcentage)



FIG. 4.10 – Cycle saisonnier de la contribution des PFT agricoles à la NPP (**a**.) et à la Rh (**a**. valeurs corrigées en lien avec la normalisation de la NEE) cumulées sur l'Europe (TgC/jour) en moyenne 1996-2002 (ligne pointillée) et en 2003 (ligne pleine). Cycle saisonnier de la contribution des PFT agricoles à l'anomalie 2003 de NPP **c**. et de Rh **b**. simulées dans les expériences NoCROP (vert), CROP (rouge) et CROPi (bleu) (moyenne glissante sur 30 jours). Les valeurs négatives, en absolu et en anomalie, représentent d'après notre choix de convention un puits et les valeurs positives une source.

(-1.5TgC/jour en cumul sur l'Europe), surtout en zone méditerranéenne et sur la façade océanique où le climat est tempéré. Le sol est au contraire partiellement nu (sauf la partie couverte par les cultures semées en hiver) dans les deux simulations avec agriculture. Le sol est plus riche en carbone dans NoCROP et le terme de Rh compense sur l'année une NPP intégrée plus élevée.

Le double pic observé précédemment dans le cycle de la NEE (Fig. 4.4b., partie 4.2.1.1 de ce chapitre) dans les simulations CROP et CROPi, absent dans la simulation NoCROP, et plus marqué en moyenne qu'en 2003, vient de la spécificité du cycle de la NPP des PFT agricoles (Fig. 4.10a.). L'assimilation de CO_2 se fait en deux phases, dominées successivement par les cultures d'hiver et les cultures de printemps, récoltées en décalé (pas de récolte dans NoCROP). Le premier pic apparait plus prononcé dans la NEE intégrée (Fig.4.4b.) car les PFT naturels (non visibles sur la figure 4.10) contribuent aussi au premier pic par une NPP maximale en juin. Les herbacées montrent pendant le mois chaud et sec d'août 2003 une productivité inférieure à celle atteinte en hiver grâce à une reprise de la végétation malgré la chute des températures et de la durée d'ensoleillement.

L'effet de l'irrigation (divergence des courbes correspondant aux simulations CROP et CROPi) se fait sentir sur la NPP deux mois plus tôt en 2003 (Avril) qu'en moyenne (Juin), ce qui signifie que les cultures d'hiver habituellement non soumises au stress hydrique le sont en 2003 puisque l'irrigation le lève. L'irrigation a plus d'impact sur la NPP que sur la Rh, ce qui joue en faveur de l'augmentation de l'amplitude (négative) de la NEE en moyenne (Fig. 4.4b.) et d'une atténuation de la source anormale en 2003 (Fig. 4.5b.) par une mitigation partielle de la chute de NPP (Fig. 4.10c.).

L'anomalie de NPP simulée dans les expériences CROP (+2.5TgC/jour en cumul sur l'Europe) et CROPi (+2TgC/jour) (Fig. 4.10c.) est plus forte en début de saison (d'avril à juin) que celle simulée par ORCHIDEE sans agriculture (NoCROP, $\pm 1.5TgC/jour$), mais plus faible en fin de saison (de Juillet à Octobre). En effet les cultures en C3 d'hiver réagissent plus que les herbacées car leur développement est plus avancé en début de saison tandis que les herbacées sont les plus touchées en fin de saison. La réduction de productivité des herbacées en 2003 par rapport à la moyenne (source de carbone vers l'atmosphère) s'opère en réalité de façon persistante de Mai à Novembre. Les cultures en C3 de printemps sont aussi affectées mais dans une moindre mesure. Ceci est dû à ce que la surface qu'elles couvrent est inférieure à celle occupée par les herbacées en C3 d'ORCHIDEE (toutes à phénologie de type "printemps") puisqu'une partie de la surface était occupée par les cultures en C3 d'hiver. La diminution de l'anomalie de NPP au mois de juin la rendant quasiment nulle en Juillet est dûe au décalage du double pic de la NPP (entre lapériode moyenne et l'année 2003), lui-même dû au fait que la récolte des cultures d'hiver est plus précoce et le démarrage des cultures de printemps plus rapide. L'anomalie de NPP des PFT naturels (non visibles sur la figure 4.10) est la plus forte en Août et contribue à augmenter l'amplitude de ce pic dans l'anomalie de NEE simulée dans les trois cas (CROP, CROPi et NoCROP) (Fig. 4.5b.)

La réponse de la Rh est de moindre amplitude que celle de la NPP et n'est pas de signe constant entre les trois simulations (Fig. 4.10b.). La Rh est favorisée par l'excès de température en 2003 par rapport à la moyenne dans la simulation NoCROP (anomalie de source), où la limitation par le stress hydrique est faible, étant donné le prélèvement d'eau plus étalé sur l'année que dans le cas CROP (anomalie de puits). L'anomalie de Rh dans les deux simulations CROP et CROPi reste d'amplitude inférieure car elle concerne une moindre quantité de carbone stocké dans la litière et le sol. Un écart se creuse entre ces deux simulations CROP et CROPi particulièrement en Août, où le sol sous les cultures non irriguées est très sec et diminue la Rh en 2003 par rapport à la moyenne.

NPP

1996-2002

anomalie 2003



FIG. 4.11 – Structure spatiale de la contribution des PFT agricoles à la NPP moyenne 1996-2002 (a., c. et e.) et à l'anomalie 2003 (b., d. et f.) de NPP (gC/m^2 , convention atmosphérique) cumulée sur la saison Mai-Octobre, simulée dans les expériences a. et b. NoCROP, c. et d. CROP et e. et f. CROPi. La couleur rouge indique un flux positif vers l'atmosphère (source) et la couleur verte un flux négatif (puits).

4.3.2 Distribution spatiale de la NPP et de la Rh

Si l'on s'intéresse cette fois au pattern spatial de la contribution des PFT agricoles à la NPP moyenne 1996-2006 cumulée sur la saison mai-octobre, on note qu'elle est proportionnelle à leur occupation par maille (Fig. 4.11e.. En situation irriguée la productivité propre aux PFT agricoles (rapportée à leur surface) est homogène sur l'Europe (puits de $\approx -650gC/m^2$). En situation non irriguée, la productivité des PFT agricoles de l'Espagne et du sud de l'Italie (Fig. 4.11c.) est plus faible ($\approx -300gC/m^2$). Elle est encore plus faible dans ces régions (Fig. 4.11a.) dans la simulation NoCROP ($\approx -200gC/m^2$) tandis que ces herbacées pseudo-agricoles sont plus productives dans le Nord-Est de l'Europe (puits de $\approx -1000gC/m^2$). Ces résultats sont cohérents avec les analyses de rendements simulés et observés, discutées dans l'article Smith *et al.* [soumis], partie II.B.4 et dans le chapitre 3, partie 3.2.1.2.

En 2003 la productivité baisse tellement par rapport à la moyenne (anomalie de source de 70% localement, Fig. 4.11b.), dans la simulation NoCROP, que c'est ce quart Nord-Est de l'Europe qui contribue le plus à la source anormale simulée en figure 4.7a.. L'Espagne et Italie, bien que peu contributrices à l'anomalie en absolu, connaissent une chute relative de productivité aussi importante. Les zones côtières de la Manche et de l'Atlantique sont les moins affectées par cette chute relative de productivité. 2003 est en revanche une année localement favorable, dans le Nord-Ouest de l'Allemagne et l'Est de la République Tchèque, dans la simulation CROP (Fig. 4.11d.). Ces zones voient au contraire du signal source dominant, autour de l'arc alpin, une augmentation de leur productivité. La Pologne s'ajoute à ces zones favorisées en 2003, dans la simulation CROPi (Fig. 4.11f.).

Cette structure spatiale de l'anomalie de NPP simulée pour les PFT agricoles et pseudoagricoles est la même que celle analysée pour la NEE (tous PFT confondus) dans la partie II.C.3 de l'article Smith *et al.* [soumis] (Fig. ??). Ceci est dû au fait que la contribution de la NPP est dominante sur celle de l'autre composante (Rh) du flux net et que les PFT naturels réagissent comparativement peu par rapport aux PFT agricoles dans les simulations. Les herbacées pseudo-agricoles d'ORCHIDEE sont plus encore plus sensibles que les cultures d'hiver d'ORCHIDEE-STICS, et ce d'autant plus dans le Nord-Est qu'elles y sont plus productives et ont par conséquent une marge de perte de productivité plus importante. De plus, la durée maximale potentielle de la saison de croissance y est plus courte, en lien avec la latitude, donc les possibilités de compensation d'une chute de productivité temporaire au cours du cycle sont plus limitées.

Les cultures d'hiver sont devenues un puits anormal de carbone en 2003 grâce aux conditions favorables en début de saison dans les régions du Nord-Est (mais leur NPP a diminué en moyenne sur l'Europe). Les régions favorables sont celles où, malgré la canicule, les températures n'ont pas dépassé les seuils les rendant sub-optimales pour la productivité, grâce à un climat moyen plus frais et humide. Ce sont les cultures de printemps en C3 qui contribuent au puits additionnel en Pologne par leur irrigation. Les Balkans restent en revanche une région de source anormale de carbone en 2003, quelle que soit la simulation (CROP, CROPi ou NoCROP). Dans cette région, le signal est en effet dominé par les cultures en C4 comme le maïs. Or cette culture a une phénologie moins différente de celle de l'herbacée pseudo-agricoles en C4 originelle d'ORCHIDEE (de type printemps) que ne l'est celle des cultures d'hiver par rapport aux herbacées pseudo-agricoles en C3. Cette source anormale de carbone venant des Balkans est consistante avec la chute de rendement significative simulée en 2003 (Fig. 7c. de l'article Smith *et al.* [soumis]).

La chute de productivité végétale suite aux conditions caniculaires de l'été 2003 en Europe a pu être observée indirectement par satellite pour l'ensemble de la végétation naturelle et cultivée. Les données satellitaires MODIS (Fig. 4.12) montrent en 2003 une réduction nette de l'activité de la végétation de Juillet à Septembre par rapport à la moyenne 2000-2004 en Europe de l'Ouest [Reichstein *et al.*, 2007]. Rappelons que l'anomalie climatique effecte surtout les mois de Juin à Août. En Juin 2003, Les écosystèmes européens sont dans l'ensemble plus actifs qu'en moyenne



FIG. 4.12 – Anomalie de faPAR observée dans les données satellitaires MODIS successivement le 2 Juin, le 4 Juillet, le 5 Août et le 6 Septembre 2003 (de haut en bas et de gauche à droite) par rapport à la moyenne 2000-2004 (exprimée en différence absolue). La couleur rouge indique une anomalie négative de l'absorption du rayonnement par le couvert. Source : Reichstein et al. [2007].



FIG. 4.13 – Anomalie de faPAR moyenne sur 3 mois (Juillet-Septembre) et sur l'Europe (zone plus réduite que celle couverte par la figure 4.12, observée dans les données satellitaires MODIS (2000-2004) et AVHRR-GIMMS (1982-2002), exprimée en différence absolue par rapport à la moyenne de la période couverte par chaque jeu de données. Les bornes correspondant à ± 5 écarttypes moyens sont figurés par les lignes horizontales pour les deux jeux de données. Source : Reichstein et al. [2007].

car leur cycle a démarré plus tôt et leur croissance a été plus rapide. En Septembre, bien que l'anomalie climatique soit réduite, les écosystèmes sont beaucoup moins actifs qu'en moyenne. Ceci est la conséquence du raccourcissement de leur cycle et de la chute de leur productivité dans les mois qui ont précédé. Les données de faPAR ne sont pas directement comparables aux résultats de simulation présentés mais on retrouve l'absence de modifications significatives de l'activité de la végétation en Espagne pendant l'été 2003 dans les deux cas. L'anomalie 2003 négative du faPAR moyen sur ces trois mois en Europe équivaut à plus de cinq fois l'écart-type calculé sur cette période récente, de même que sur les données AVHRR de 1982 à 2002 (Fig. 4.13). Ceci montre à quel point l'été 2003 était extrême en Europe dans les conditions climatiques actuelles et que la chute de productivité observée est significative.

La Rh représente un flux positif en moyenne 1996-2002 moins important que le flux négatif correspondant à la NPP, car, sur les cartes présentées en figure 4.11 et 4.14, l'intégrale est effectuée sur la période Mai-Octobre. En situation non irriguée (Fig. 4.14c.), c'est en France et en Angleterre que la respiration des sols agricoles est la plus élevée (source de $\approx 500g/m^2$), où la température est plus élevée que dans le Nord-Est et l'humidité du sol plus favorable qu'en zone méditerranéenne pour la décomposition. En situation irriguée ce sont les régions du Sud de l'Europe qui respiren le plus car le stress hydrique n'est plus limitant. Dans la simulation NoCROP, c'est le Nord-Est, où l'apport de litière au sol est le plus important, qui contribue le plus au flux européen.

En 2003, la Rh est peu modifiée (Fig. 4.14b., d. et f.), comparativement à la NPP (Fig. 4.11b., d. et f.), et contribue par conséquent moins à l'anomalie 2003 de NEE (Fig. 4.7). Une légère source anormale (Fig. 4.14b.) due à l'augmentation de la température sans limitation hydrique s'additionne tout de même à la réduction du puits (Fig. 4.11b.) dans le cas NoCROP. Les surfaces agricoles europénnes de la simulation CROP génèrent plutôt un léger puits anormal à cause de l'effet limitant de la sécheresse dominant l'effet bénéfique des températures. Ceci tend à creuser l'écart (déjà amorcé par les différents niveaux de chute de productivité) entre les estimations des simulations avec et sans agriculture réaliste. Dans la simulation CROPi, l'anomalie de respiration des PFT agricoles ne montre aucune tendance nette.

4.3.3 Bilan des effets de l'été 2003 et de la prise en compte de l'agriculture sur les flux de carbone

La figure 4.15 récapitule à quelle hauteur la NPP et la respiration, flux calculés pour les PFT agricoles et les PFT naturels dans chaque simulation (NoCROP, CROP et CROPi), contribuent à l'anomalie européenne de flux net de carbone simulée et observée de Mai à Octobre 2003 :

- La chute de NPP en 2003, bien que notable dans les trois simulations, est de plus en plus faible avec l'amélioration des versions du modèle. Elle représente -25 %, -22% et -13% de la productivité moyenne (1996-2002) respectivement dans les simulations NoCROP, CROP et CROPi (Fig. 4.15 bas & haut, gauche).
- Cette chute de NPP est plus sévère (en absolu et en relatif) pour les PFT agricoles (-40%, -38% et -21%) que pour les PFT naturels. La contribution des PFT agricoles à l'anomalie de NPP est de deux tiers à trois quart tandis que leur contribution à la NPP moyenne est inférieure à la moitié. Cette dernière se rapproche des ≈ 40% de surface qu'ils occupent dans notre fenêtre européenne. Ceci signifie que sur l'Europe ces deux groupes d'écosystèmes sont en moyenne aussi productifs par unité de surface. En 2003 en revanche, les écosystèmes naturels ont moins souffert de la sécheresse, grâce à la plus grande résistance des végétaux ligneux et à leur saison de croissance plus longue.
- C'est la chute de NPP en 2003 qui constitue la majeure partie de la source nette de 0.4



FIG. 4.14 – Structure spatiale de la contribution des PFT agricoles à la Rh moyenne 1996-2002 (a., c. et e., corrigée en lien avec la normalisation de la NEE) et à l'anomalie 2003 (b., d. et f.) de respiration (gC/m^2) , convention atmosphérique) cumulée sur la saison mai-octobre, simulée dans les expériences a. et b. NoCROP, c. et d. CROP et e. et f. CROPi. La couleur rouge indique un flux positif vers l'atmosphère (source) et la couleur verte un flux négatif (puits).



FIG. 4.15 – Moyenne 1996-2002 (haut) et anomalies 2003 (bas) (GtC, convention atmosphérique) de la NPP, la Rh et la NEE cumulées sur l'Europe et la saison Mai-Octobre, simulées dans les expériences NoCROP (vert), CROP (rouge) et CROPi (bleu). La contribution des PFT agricoles est représentée en couleurs pleines et celle des PFT naturels étant représentée en hachuré. Les valeurs négatives, en absolu et en anomalie, représentent d'après notre choix de convention un puits et les valeurs positives une source. Les valeurs totales (PFT agricoles + PFT naturels) de l'anomalie 2003 de NEE présentées en bas à droite correspondent aux valeurs de la figure 4.3 (partie 4.2.1) qui ont été comparées aux inversions.

(NoCROP) à 0.2GtC (CROPi) discutée précédemment, à la fois dans son développement temporel et dans son pattern spatial (Fig. 4.15 bas, gauche & droite). Les modifications de la respirations sont en effet négligeables (de +3% en 2003 par rapport à la moyenne dans la simulation NoCROP à -4% dans la simulation CROP tous PFT confondus)(Fig. 4.15 bas, milieu). La chute de NPP explique de 87 à 98% de l'anomalie européenne de NEE cumulée sur la saison Mai-Octobre selon les simulations.

La figure 4.15 permet aussi de synthétiser l'effet de la prise en compte d'une agriculture plus réaliste sur les composantes du bilan de carbone et leur réponse à la canicule de 2003 :

- Par rapport à la simulation NoCROP, la prise en compte des surfaces cultivées dans la simulation CROP réduit les deux termes du bilan (NPP et Rh) en moyenne (1996-2002). Les surfaces agricoles plus réalistes sont moins productives (d'≈ 40%, cf. chapitre 3, fin de partie 3.1) et respirent moins (Fig. 4.15 haut, gauche & milieu).
- La prise en compte des cultures réduit l'anomalie de NPP en 2003 par une diminution de la sensibilité des PFT agricoles⁴. Les anomalies de respiration en 2003, même faibles, amplifient cet effet réducteur de la chute de NPP et conduisent à une réduction plus importante de l'anomalie de NEE (Fig. 4.15 bas).
- En moyenne (1996-2002) l'irrigation augmente la NPP et la Rh mais cette dernière dans une moindre mesure, donc elle augmente augmente finalement la NEE (Fig. 4.15 haut). L'irrigation atténue l'anomalie de NPP et par conséquent l'anomalie de NEE; son effet sur la respiration est positif mais faible (Fig. 4.15 bas).

4.3.4 Discussion

On a vu que les simulations avec une représentation plus réaliste des surfaces agricoles produisent, en réponse à l'anomalie climatique de l'été 2003, une anomalie de source plus faible de moitié que celle obtenue avec la version originelle du modèle pour l'ensemble des PFT (Fig. 4.15 bas, droite). La part de cette source anormale de carbone provenant des PFT agricoles reste quand même suffisamment importante pour annuler (CROPi) le puits qu'ils représentent à la même période (Mai-Octobre) pendant 1 année moyenne à l'équilibre (Fig. 4.15 haut, droite). Avec la simulation CROP, la source annule le puits moyen de 2 saisons Mai-Octobre (contre 4 dans la simulation NoCROP). Pour les PFT naturels, la source de carbone de Mai-Octobre 2003 est inférieure au puits moyen (1996-2003) et ne l'annule pas totalement ($\approx 60\%$).

Au moyen d'une inter-comparaison entre plusieurs modèles de biosphère, Vetter *et al.* [2007] ont montré que les processus de respiration (végétation et sols) ont été moins affectés que la photosynthèse par la canicule. La respiration (surtout la respiration hétérotrophe) a en effet une saisonnalité moins marquée que l'assimilation photosynthétique, sur laquelle repose la fonction de puits de carbone des plantes en été. Nos résultats, tous PFT confondus, vont dans le même sens.

Dans cette inter-comparaison menée sur une Europe plus large de trois fois notre fenêtre d'étude, ORCHIDEE (non couplé à STICS) estime une anomalie de NEP en 2003 qui figure en haut de la fourchette des estimations par les sept modèles participant. Cette constatation reste vraie si l'on considère uniquement la partie de l'Europe correspondant à notre fenêtre d'étude (Europe de l'Ouest, une partie de l'Europe du Nord et de l'Europe de l'Est). Malgré la différence entre forçage climatique, paramètres du sol et carte de végétation utilisés dans Vetter *et al.* [2007] et dans cette thèse, on peut supposer que l'anomalie simulée par ORCHIDEE serait

⁴Ils sont moins affectés que les PFT pseudo-agricoles originels mais restent plus affectés que les PFT naturels.

réduite si la version participant à l'inter-comparaison était ORCHIDEE-STICS. Si la réduction est de $\approx -50\%$ comme on l'a estimé (dans les conditions de simulations décrites au chapitre 1), la nouvelle anomalie simulée se positionnerait plutôt au milieu de la fourchette des sept modèles. Il serait intéressant de savoir si le même effet sur l'estimation de l'anomalie 2003 européenne de NEE a été obtenu avec LPJmL [Bondeau *et al.*, 2007] *vs.* LPJ. Si c'est l'introduction de la phénologie des cultures d'hiver (pour la plupart déjà récoltées au moment où les températures extrêmes s'installent) et de l'irrigation, qui comme dans ORCHIDEE-STICS sont responsables de la diminution de l'anomalie, alors, LPJ sans repésentation des cultures aurait estimé une anomalie plus importante que LPJmL dans Vetter *et al.* [2007]. Dans LPJmL cependant, le sol n'est pas forcément nu après la récolte des céréales (interculture), et la gestion des résidus de culture peut varier. Ces facteurs influencent la productivité cumulée sur l'année ainsi que la respiration du sol, et peuvent par conséquent moduler les résultats et donc la comparaison avec ceux que l'on a obtenus dans cette thèse.

L'estimation par ORCHIDEE-STICS d'une source anormale en 2003 de 0.20 à 0.25 GtC (selon le niveau d'irrigation) peut être comparée aux émissions annuelles dûes aux combustibles fossiles : celles-ci sont estimées à 1.05GtC/an rapportées à la même surface. Bien que moins élévée que l'estimation par ORCHIDEE seul, l'anomalie telle que simulée par ORCHIDEE-STICS et par les deux modèles inverses augmente d'un quart les émissions de CO₂ européennes annuelles.

De leur côté, Ciais *et al.* [2005] estiment à 0.5~GtC l'anomalie 2003 de NEP. Celle-ci est cependant calculée sur une période plus courte (Juillet-Septembre), sur une Europe presque deux fois plus étendue et en référence à la période moyenne 1998-2002. On suppose qu'elle est comparable à l'anomalie simulée par ORCHIDEE seul dans cette thèse, aux différences de protocole expérimental près. Comme elle a été calculée avec une version d'ORCHIDEE n'incluant pas de réprésentation réaliste des surfaces cultivées, on peut penser qu'elle est sur-estimée. La source anormale de carbone en 2003 estimée par ORCHIDEE-STICS renverse approximativement une à deux années du puits biosphérique européen estimé par Janssens *et al.* [2003] (*cf.* introduction, partie 0.1.4).

Synthèse sur les flux de carbone européens en 2003

(Article Smith et al. [soumis] et Chapitre 4)

L'analyse des composantes du flux net de CO_2 (NEE) de la biosphère vers l'atmosphère en 2003 a montré que la **chute de NPP** par rapport à la période 1996-2003 **explique** \approx 90% de la réponse simulée des écosystèmes européens à la canicule. Ceux-ci ont généré une source nette anormale de carbone vers l'atmosphère entre Mai et Octobre à cause du moindre prélèvement de CO_2 atmosphérique pour leur croissance en 2003. L'anomalie de respiration hétérotrophe y contribue peu. Cette source est, selon ORCHIDEE-STICS toute végétation confondue, de même intensité que le puits moyen (1996-2002) que représentent les écosystèmes européens à la même période de l'année.

La contribution respective des PFT agricoles et naturels au puits moyen est proportionnelle à la fraction de surface qu'ils occupent en moyenne en Europe (40% et 60%). En revanche en 2003, les **PFT agricoles ont plus souffert que les PFT naturels (ligneux)**, dû à la moindre résistance et profondeur d'enracinement des plantes annuelles. La NPP des PFT agricoles chute de $\approx -25\%$ à $\approx -35\%$. Leur réponse explique 70% de l'anomalie de NEE. La structure saisonnière en deux pics à la fois du flux net moyen et de l'anomalie 2003 (flux de signe source vers l'atmosphère) des PFT agricoles est caractéristique des cultures dont la phénologie est forcée par STICS. En favorisant la productivité, l'irrigation atténue de $\approx 20\%$ la source anormale de CO₂, même si elle favorise légèrement la respiration hétérotrophe (composante source de la NEE). Rappelons que les herbacées pseudo-agricoles en C3 d'ORCHIDEE (dominantes en Europe), non irriguées et à phénologie les exposant aux conditions estivales extrêmes souffrent encore plus de la canicule que les PFT agricoles, déjà partiellement récoltés. Ceci se traduit par un écart de 100% entre la source de carbone en 2003 estimée par la simulation NoCROP et par la simulation CROPi. On a vu que c'est surtout le quart Nord-Est de notre fenêtre d'étude qui contrôle la réponse européenne en 2003.

Si l'on prend comme référence les estimations de deux approches indépendantes de modélisation atmosphérique inverse, l'anomalie européenne saisonnière de NEE en 2003 simulée avec ORCHI-DEE seul correspond donc au double. En revanche, l'**anomalie simulée par ORCHIDEE-STICS est en meilleur accord avec ces estimations inverses**, $\approx 0.2GtC$ selon Peylin *et al.* [2005] et $\approx 0.25GtC$ selon Rödenbeck *et al.* [2003]. Ces deux estimations sont proches en 2003, contrairement aux six années qui ont précédé, où les anomalies sont plus faibles mais plus différentes, de signe même souvent contraire. En 2003 l'anomalie détectée dans les mesures de concentrations en CO₂ atmosphérique à plusieurs stations européennes est très nette. A ces **échelles** temporelle et spatiale intégrées de la **saison** et du **continent**, on considère les estimations inverses comme **fiables**. Après exploration des résultats des inversions à la résolution à laquelle elles sont disponibles (par exemple : mensuelle, $4^o \times 5^o$), on a décidé de ne pas les exploiter pour discriminer les simulations d'ORCHIDEE avec ou sans représentation améliorée de l'agriculture. En effet le développement temporel de l'anomalie 2003 est décalé de deux mois entre les deux inversions et le centre d'action est décalé de 20^o de longitude. Ces décalages causent de grandes différences locales, supérieures eux écarts entre simulations. Nos résultats montrent que la prise en compte des cultures de manière plus réaliste dans OR-CHIDEE via STICS conduit à une ré-évaluation à la baisse de la source anormale de CO_2 vers l'atmosphère en 2003 par les écosystèmes européens. Bien que moins élévée que l'estimation par ORCHIDEE seul, l'anomalie telle que simulée par ORCHIDEE-STICS (0.20 à 0.25 GtC selon le niveau d'irrigation) et par les deux modèles inverses augmente d'un quart les émissions de CO_2 européennes annuelles dûes aux combustibles fossiles : celles-ci sont estimées à 1.05 GtC/an rapportées à la même surface. Dans leur étude, Ciais et al. [2005] estiment à 0.5 GtC l'anomalie 2003 de NEE. Celle-ci est cependant calculée sur une période plus courte (Juillet-Septembre), sur une Europe presque deux fois plus étendue et en référence à la période moyenne 1998-2002. On suppose qu'elle est comparable à l'anomalie simulée par ORCHIDEE seul dans cette thèse, aux différences de protocole expérimental près. Comme elle a été calculée avec une version d'OR-CHIDEE n'incluant pas de réprésentation réaliste des surfaces cultivées, on peut penser qu'elle est sur-estimée. La source anormale de carbone en 2003 estimée par ORCHIDEE-STICS **renverse** approximativement une à **deux années du puits biosphérique européen** estimé par Janssens et al. [2003]. Or ce puits participe à plus de 10% au puits net actuel global de 1GtC/an.

Conclusion - Perspectives

L'Homme modifie son environnement depuis sa sédentarisation au Néolithique, accompagnée de la pratique de l'agriculture. L'influence de l'Homme sur son milieu est devenue considérable surtout depuis le XIX^{ème} siècle. Elle se traduit par une extension globale des surfaces exploitées au détriment des forêts, prairies et savanes; les écosystèmes naturels ne seront bientôt plus majoritaires [Vitousek et al., 1997]. Ces changements radicaux de la couverture végétale sont globalement responsables d'émissions de carbone vers l'atmosphère qui s'ajoutent à celles dûes à l'utilisation des combustibles fossiles et participent à l'augmentation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre. Celle-ci est très probablement à l'origine de l'augmentation de la température moyenne globale observée au cours du dernier siècle [IPCC, 2007]. Ce changement climatique influence en retour le fonctionnement des écosystèmes. Dans ce contexte de changements environnementaux globaux, que la biosphère subit et auxquels elle participe à travers différentes rétro-actions perturbées par la main de l'Homme, plusieurs questions se posent : quelle sera l'évolution des réservoirs de carbone de la biosphère continentale que sont la végétation et les sols en réponse aux tendances et à la variabilité climatiques futures? Quelle est la contribution des surfaces cultivées à ces perturbations? Les incertitudes sur les bilans de carbone passés et actuels sont déjà grandes et une multiplicité d'études expérimentales et de modélisation tentent de les réduire. Ma thèse s'inscrit dans ce contexte général et a abordé le problème sous l'angle de la modélisation.

Un point faible a été identifié dans tous les modèles globaux de végétation, inclus ou non dans un modèle de climat : la simplification consistant à considérer les cultures comme de simples herbacées naturelles. Elle n'empêche pas les analyses au premier ordre d'apporter des réponses à la question majeure des effets de la déforestation sur le cycle du carbone et le système climatique. Cependant cette simplification ne permet pas de prendre en compte les effets spécifiques des écosystèmes cultivés sur les processus biophysiques et biogéochimiques régulant le échanges d'eau, d'énergie et de carbone entre la végétation et l'atmosphère. Le moment est venu de quantifier l'impact de ces écosystèmes dont le fonctionnement est complètement géré par l'Homme. La surface qu'ils couvrent sur les continents continue de s'étendre et la pression qui s'exerce sur eux pour produire les services nécessaires aux besoins humains est grandissante. En tant que zone tempérée représentative de l'agriculture intensive, l'Europe a été choisie comme région d'étude pilote. La méthode employée associe le modèle de biosphère continentale ORCHIDEE au modèle de cultures générique STICS pour une meilleure représentation des surfaces cultivées.

Avancées et limites

Le développement du modèle ORCHIDEE-STICS a été initié cours de la thèse qui a précédé la mienne [Gervois *et al.*, 2004]. J'ai poursuivi ce développement et rendu le modèle opérationnel pour diverses applications à l'échelle de l'Europe, ou plus largement pour répondre à des objectifs qui dépassent cette thèse (chapitre 1). La communication entre les deux modèles a été établie *via* une plate-forme de couplage flexible et la spatialisation de STICS a été automatisée. Une culture peut être remplacée par une autre, des variables d'échange peuvent être ajoutées. STICS transmet pour l'instant à ORCHIDEE en chaque point de grille **au pas de temps journalier** quatre variables-clés en échange du forçage climatique. Via l'indice foliaire (LAI), la phénologie des cultures de STICS conditionne le démarrage et la fin de la saison de croissance et la surface foliaire disponible pour l'assimilation photosynthétique dans ORCHIDEE. On fait dépendre la photosynthèse aussi de l'irrigation et du stress azoté calculés par STICS. L'apport de la hauteur du couvert calculée par STICS n'a pas été quantifié dans cette étude : elle joue cependant sur la conductance stomatique et le bilan d'énergie et est donc un facteur-clé dans l'étude de l'impact biophysique des surfaces cultivées. Le même type d'approche de "couplage" été utilisé par Olioso et al. [2001, 2002] : ISBA a été forcé par le LAI, la hauteur du couvert, la matière sèche aérienne, l'humidité du sol en surface et dans la zone racinaire de STICS et couplé à des modèles de transferts radiatifs; l'objectif étant de proposer un modèle (validé vis-à-vis de mesures) pour l'assimilation de données de télédétection en vue de piloter la croissance des cultures. Bien que limitant l'application à une région donnée (contrairement aux approches globales comme [Bondeau et al., 2007] intégrant directement de nouvelles formulations dans le modèle initial, le couplage présente l'avantage suivant : mettre à profit les solides connaissances agronomiques concentrées dans les modèles de cultures.

Une étape de mon travail a consisté à introduire un type de cultures supplémentaire par rapport au blé et au maïs de Gervois *et al.* [2004], pour disposer en tout de trois PFT agricoles. On lève ainsi la limitation soulignée dans les perspectives des travaux de Gervois *et al.* [2004] comme handicapant la comparaison de la phénologie simulée par le modèle aux données satellitaires. On peut maintenant **distinguer**, et traiter simultanément, **les cultures en C3 semées en hiver de celles semées au printemps**. La version initiale du modèle ORCHIDEE non couplé à STICS se basait sur deux types fonctionnels de plantes (PFT) pseudo-agricoles herbacés (C3 et C4) dont le cycle démarre naturellement au printemps et qui ne sont pas récoltées. Au sein de chaque maille du modèle, mosaïque de types de végétation naturelle et agricole, les PFT "cultures en C3 d'hiver", "cultures en C4" et "cultures en C3 de printemps" sont représentés respectivement par les **paramètres du blé, du maïs et du soja**. Les paramètres spécifiques à chaque PFT dans ORCHIDEE et la carte de végétation ont dû être adaptés. Pour renseigner les fractions cultivées en chacun des trois types, j'ai combiné des données de surface couverte par l'agriculture et de contribution relative de chaque type de cultures à cette surface agricole.

Trois types de simulations ont été réalisées, à surfaces cultivées et pratiques agricoles fixes, pour quantifier la réponse du fonctionnement des cultures à la variabilité inter-annuelle récente : une simulation avec la version de référence d'ORCHIDEE, une avec ORCHIDEE-STICS et une avec ORCHIDEE-STICS en activant le calcul automatique de l'irrigation. La comparaison des deux premières quantifie l'**apport de la composante agricole**, et celle des deux dernières l'**effet de l'irrigation**. J'ai analysé le réalisme des simulations par ORCHIDEE-STICS de la phénologie, de la productivité et du bilan de carbone des surfaces cultivées en Europe⁵, par confrontation des résultats de ces simulations à trois types de séries temporelles de données spatialisées : des **indices de végétation tirés d'observations satellitaires**, des **statistiques de rendement de cultures** et des **estimations atmosphériques inverses**. Pour chaque type de données, j'ai recouru à plusieurs sources pour diversifier les comparaisons et mesurer la robustesse des interprétations.

En résumé, d'un point de vue méthodologique, cette thèse a permis de mettre à disposition une connaissance des principaux points forts et faibles de l'approche ORCHIDEE-STICS, et un outil opérationnel et qui présente un potentiel pour une variété d'applications. On a entre autres questionné les capacités de généricité de la représentation de l'agriculture européenne en trois types de végétation. L'évaluation de l'accord modèle-observations a fait intervenir des données de différentes natures, qu'on a manipulées et dont on a tenté d'exploiter le maximum d'information

⁵On entend par Europe, ici et par la suite, la fenêtre de 30° de longitude et 20° de latitude dont le Lac Léman marque le centre. Les seuls grands pays inclus en entier sont la France, l'Allemagne, L'Espagne et l'Italie

dans les limites de l'**incertitude** associée à chaque jeu. Les résultats ont été autant que possible re-positionnés par rapport à ceux de l'approche LPJmL (Bondeau *et al.* [2007], en Annexe B) et aux autres approches expérimentales ou de modélisation décrites dans la littérature.

Sur le plan scientifique, cette thèse a montré l'**importance** et quantifié l'effet de **mieux prendre en compte les cultures dans un modèle de biosphère** sur les composantes du bilan carbone de la végétation, à l'échelle européenne.

• Le meilleur **cycle saisonnier** simulé pour les cultures permet de proposer des améliorations de l'assortiment des types de phénologie dans la mosaïque de végétation du modèle. Cette meilleure représentation de la phénologie définit mieux la durée, l'amplitude et le positionnement de la saison de croissance dans l'année, et donc les conditions environnementales auxquelles les cultures sont exposées. (*cf.* Synthèse sur le cycle saisonnier foliaire des cultures en Europe en fin de chapitre 2).

• Par conséquent on simule plus réalistement la **productivité annuelle moyenne** des cultures et sa **variabilité** inter-annuelle et spatiale. L'irrigation a pour effet d'augmenter la productivité et d'atténuer sa variabilité. Elle peut ainsi limiter l'impact néfaste d'évènements extrêmes selon leur nature et leur localisation en Europe. (*cf.* Synthèse sur la productivité moyenne, inter-annuelle et extrême des cultures en fin de chapitre 3).

• La chute de productivité comme lors de l'été caniculaire de 2003 est à l'origine d'une source de carbone pour l'atmosphère qui a annulé temporairement les bénéfices du puits biosphérique européen. La source estimée avec ORCHIDEE-STICS bien que contribuant à augmenter significativement les émissions de CO_2 par les activités humaines en Europe est deux fois moins élevée que les précédentes estimations basées sur la simple représentation des cultures en herbacées semi-naturelles dans ORCHIDEE. (*cf.* Synthèse sur les flux de carbone européens en 2003 en fin de chapitre 4).

Une bonne représentation des cultures apparaît nécessaire à la fiabilité de la réponse du modèle aux projections futures qui suggèrent une plus grande fréquence d'évènements extrêmes.

Le **premier volet** de cette thèse consiste en l'**évaluation** de la phénologie et de la productivité simulées par ORCHIDEE-STICS à l'échelle européenne. Il regroupe l'article Smith *et al.* [soumis], le chapitre 2 et les premières parties des chapitres 3 et 4. La confrontation des variables du modèle aux diverses données a mené aux conclusions générales suivantes :

- la composante agricole utilisant STICS apporte une **amélioration par rapport à OR-CHIDEE seul**, dont les herbacées pseudo-agricoles ont un cycle trop long, tardif et variable, une productivité annuelle moyenne trop élevée de $\approx 40\%$ en Europe, une mauvaise réponse à la variabilité inter-annuelle et spatiale du climat et une sensibilité deux fois trop forte du flux net de CO₂ à la canicule de 2003
- les simulations d'ORCHIDEE-STICS sont réalistes, grâce au double-pic d'indice foliaire associant la phénologie des cultures d'hiver et de printemps, à la distribution spatiale et l'intensité de la chute de productivité en 1976 et 2003 correctes, comme l'attestent les différents diagnostics effectués
- les imperfections qui subsistent suggèrent qu'une amélioration supplémentaire ne pourra être atteinte sans **revenir sur certains manques de l'approche** ORCHIDEE-STICS, apparus comme limitants à plusieurs reprises

On recommande donc d'abandonner la représentation originelle des surfaces cultivées dans OR-CHIDEE et de poursuivre la prise en compte des cultures selon deux axes : améliorer ORCHIDEE-STICS pour les applications régionales et changer d'approche en vue de simulations globales qui sont précisées dans les perspectives.

Les limites de l'approche ORCHIDEE-STICS ne tiennent pas uniquement au modèle luimême. Notre approche a en commun avec les autres approches décrites en introduction (section 0.2.2) des limites liées à la disponibilité des données nécessaires pour forcer et évaluer le modèle et aux choix faits pour la représenttaion des cultures. Ces limites ont été mises en évidence lors de la rencontre QUEST entre modélisateurs de la biosphère intéressés par les spécificités des écosystèmes agricoles [Scholze *et al.*, 2005] (en Annexe A).

• On a évoqué le **raffinement nécessaire de la carte de végétation** du modèle et en particulier des fractions relatives de chaque culture, qui devraient varier à l'intérieur des pays. Ces données sont importantes pour la justesse des estimations agrégées par maille. Elles le sont aussi pour la cohérence de la végétation considérée dans le modèle et les observations de la réalité dans l'évaluation de la phénologie et de la productivité, bien que le traitement des données satellitaires et de rendement se basent sur des informations de surfaces qui ne proviennent pas de la même source.. Dans le cadre du projet CarboEurope, une carte d'occupation du sol produite par Jung *et al.* [2006] est devenue disponible et a été utilisée dans l'inter-comparaison de Vetter *et al.* [2007]. Sa résolution spatiale est plus fine mais ne renseigne pas sur la façon dont les cultures se répartissent la surface au sein de la fraction agricole totale.

• En parallèle de la meilleure répartition des surfaces cultivées, on préconise, afin de mieux capturer la réponse à l'échelle sub-nationale, de **spatialiser les pratiques culturales et les paramètres du sol**. Faute de disposer à l'échelle européenne de ce type de données au format nécessaire à STICS, on pourra dans un premier temps réaliser avec ORCHIDEE-STICS des tests de sensibilité à la variabilité des pratiques. Une discussion engagée avec des chercheurs du Centre Commun de Recherches (JRC⁶) a permis d'entrevoir la possibilité d'utiliser des paramètres variétaux de la phénologie, des calendriers culturaux et des données de fertilisation variables spatialement. Il s'agit de données exploitées dans le cadre du projet MARS⁷, dont le système de prévision des rendements est le produit. Le modèle de cultures utilisé dans ce système est WOFOST. Il serait aussi souhaitable de disposer de la variabilité temporelle de ces informations.

• La définition des PFT et l'objectif de représentativité de chacun d'eux (utilisation locale spécifique ou intégration européenne) doivent être clairs. Pour une application d'ORCHIDEE-STICS à l'échelle européenne, on recommande, tout en gardant le compromis de limiter le nombre de PFT agricoles à trois, d'abandonner le soja au profit de cultures de printemps à cycle saisonnier moins abrupt, a priori plus représentatives de la phénologie observée. Le soja peut toutefois s'avérer utile, étant fortement cultivé aux Etats-Unis (55% de la production mondiale) et en Chine par exemple, où l'application d'ORCHIDEE-STICS serait envisageable moyennant de disposer de données de pratiques culturales pour ces zones. La betterave serait un bon candidat pour l'Europe ; la France représente 13% de la production mondiale de sucre de betteraves, ce qui la place en tête [Source : FAO]. On pourrait également envisager de faire varier le choix de la culture représentant le PFT "cultures en C3 de printemps" en fonction des conditions pédo-climatiques et technico-économiques du lieu.

Outre la levée des limitations principales décrites ci-dessus, extérieures à la modélisation des processus, l'amélioration du modèle pourra se poursuivre par les modifications suivantes.

⁶Joint Research Centre, Ispra, Italie

⁷Monitoring Agriculture from Remote Sensing

• L'adaptation des paramètres de la photosynthèse des cultures en C4 devra être réalisée pour que la productivité simulée en zone méditerranéenne par ORCHIDEE-STICS soit plus réaliste. Si l'amélioration n'est pas satisfaisante, on pourrait procéder à une optimisation des paramètres à partir de mesures de flux sur sites.

• La création d'un schéma d'allocation spécifique aux organes de récolte serait nécessaire pour rétablir la cohérence entre fractions de NPP récoltée et résidus transmis à la litière. Cette allocation, à l'image de celle développée dans LPJmL (Bondeau *et al.* [2007], Annexe B) pourrait se baser sur des fonctions génériques de remplissage des organes de récolte en fonction de la phénologie. Celles-ci pourraient être dérivées du modèle STICS via des simulations en conditions optimales ou avec stress hydrique et/ou azoté. L'avantage de connaître précisément l'évolution saisonnière du contenu de ce compartiment de biomasse des cultures est qu'il intègre les conditions climatiques de la saison de croissance entière. L'application d'un coefficient moyen à la NPP cumulée jusqu'à la récolte (comme on l'a fait au chapitre 3) ne permet pas de capturer la réponse fine des rendements à la variabilité climatique saisonnière et inter-annuelle. Une variation saisonnière de la surface spécifique des feuilles (SLA) pourrait être introduite dans ORCHIDEE pour améliorer le réalisme du lien entre surface et biomasse foliaires.

Le choix des variables à échanger entre ORCHIDEE et STICS et des processus à représenter devrait être complété afin de minimiser le risque de divergence des deux calculs du bilan d'eau, pour l'instant indépendants mis à part les apports d'eau par l'irrigation. Ainsi, la transmission journalière du contenu en eau du sol d'ORCHIDEE à STICS permettrait de rétablir la cohérence entre le stress hydrique vu par le LAI des cultures calculé par STICS et la photosynthèse calculée par ORCHIDEE. ORCHIDEE-STICS pourrait être testé avec la version d'ORCHIDEE qui inclut à présent le cycle de l'azote. L'effet de pratiques comme l'interculture, la gestion des résidus et le labour sur le bilan d'eau et de carbone pourrait être testé. Smith et al. [2000a] a montré que le labour contribue à diminuer de jusqu'à 30% le stock de carbone du sol en aérant la matière organique. Ce stock de carbone dans les sols agricoles est déjà plus pauvre que celui des sols forestiers, en raison de l'export de matière lors de la récolte, qui n'est plus disponible pour alimenter la litière puis la matière organique du sol [Arrouays et al., 2002]. Selon la fraction de résidus incorporés au sol ou exportés, Bondeau et al. [2007] obtiennent une fourchette de valeurs qui encadre de $\pm 0.1 GtC/an$ l'émission globale annuelle de CO₂ dûe au changement d'utilisation des sols. Cette émission est estimée à $\approx 1.3 GtC/an$ basée sur les données d'occupation du sol de Ramankutty & Foley [1999] et à $\approx 2GtC/an$ basée sur les données IMAGE [IMAGE, 2001]. Ce résultat pointe sur le problème de l'incertitude liée aux données utilisées par les modèles pour contraindre les simulations intégrant la description de ces nouveaux processus.

L'évaluation d'ORCHIDEE-STICS devrait être complétée.

• On a utilisé dans les simulations un seul forçage climatique et très marginalement une ancienne version de celui-ci, présentant des différences en particulier dans l'intensité de l'anomalie climatique de 1976. Afin de mesurer l'incertitude des résultats liée au forçage climatique, il serait préférable d'en tester plusieurs. On pense par exemple aux données NCC⁸ et au forçage REMO⁹ à 25km de résolution. La qualité de ce denier a été analysée dans le cadre du projet CarboEurope par Chen *et al.* [2007] et utilisé pour l'inter-comparaison européenne de Vetter *et al.* [2007]. Ciais *et al.* [2005] font mention du fait que leur estimation de l'anomalie 2003 de flux net de CO₂ est incertaine et qu'un test avec un autre forçage climatique a donné un résultat différent de 50%.

• Dans le prolongement de cette thèse et en vue de l'étude ultérieure de l'effet biophysique des surfaces cultivées, on devrait analyser les variables des bilans d'eau et d'énergie comme les flux de

⁸NCEP Corrected by CRU

⁹ré-analyses du modèle régional d'atmosphère méso-échelle REMO

chaleurs latente et sensible, le rapport entre les deux, le contenu en eau du sol, le ruissellement... Les sites de mesures de flux au dessus de couverts agricoles sont devenus plus nombreux ces dernières années (dans le cadre du projet CarboEurope) et ont commencé à produire des données exploitables pour une confrontation avec les simulations. Il sera intéressant de comparer sur une série de sites les résultats d'une simulation forcée par des données météorologiques locales avec ceux d'une simulation forcée par les champs des mailles (contenant les sites) extraits du forçage global à 0.5° de résolution. Cette quantification de l'impact du changement d'échelle reste à faire. Le bilan d'eau pourrait être évalué à l'échelle de bassins versants vis-à-vis de données de débit de fleuves.

Malgré tout ce qu'il faudra idéalement réaliser pour avoir encore plus confiance en les résultats de notre approche à échelle régionale et résolution fine, on a souhaité exploiter le modèle pour mieux comprendre certains aspects du bilan de carbone européen. Le **deuxième volet** de cette thèse consiste en la **quantification** d'anomalies de productivité des cultures et de flux de CO_2 des écosystèmes européens et l'**interprétation** spatiale et temporelle de leurs causes. Il regroupe les deuxièmes parties des chapitres 3 et 4. Sur la base de nos simulations, on a montré que

- la chute de productivité nette des cultures ($\approx -30\%$) dûe à la sécheresse de 1976 et à la canicule de 2003 est liée à une réduction de l'assimilation photosynthétique brute et des efficiences d'utilisation de l'eau et du CO₂ assimilé.
- − cette chute de productivité des cultures explique ≈ 70% de celle de l'ensemble de la végétation européenne en 2003 alors que ces écosystèmes cultivés ne couvrent que ≈ 40% de la superficie de l'Europe
- la chute de productivité de l'ensemble de la végétation européenne explique $\approx 90\%$ de l'anomalie de flux net de CO₂, indiquant que la respiration des sols a peu contribué à la source de carbone vers l'atmosphère

D'autres études peuvent être réalisées à partir des simulations existantes et de nouvelles simulations.

Perspectives

Mon travail ouvre la voie à plusieurs applications. Certaines d'entre elles sont déjà en cours et vont se poursuivre entre autres avec le travail d'ingénieurs, de doctorants et post-doctorants.

• Quelle influence ont la distribution spatiale et temporelle des flux de CO_2 à la surface terrestre sur les variations de la teneur en CO_2 atmosphérique?

ORCHIDEE-STICS a simulé les flux de carbone (assimilation brute, respirations et flux net) journaliers à $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ échangés entre la surface et l'atmosphère sur l'Europe sur la période 1996-2003. Les flux simulés pour les surfaces cultivées sont en train d'être combinés à ceux simulés par un modèle de prairies gérées [Vuichard, 2005] et à ceux simulés par une version récente du modèle ORCHIDEE pour les PFT naturels. Ils seront ensuite transportés dans le modèle de circulation atmosphérique régionale CHIMERE (et globale, LMDz) en vue d'une comparaison des concentrations en CO₂ simulées aux observations en un réseau de stations [Thèse de Céline Aulagnier].

• Quelle est l'interaction entre économie, bilans d'eau et de carbone et changement climatique ? La méthode développée pour associer ORCHIDEE-STICS et le modèle économique AROPAj dans le cadre d'un projet GICC¹⁰ décrit brièvement en annexe D a été appliquée dans un premier

 $^{^{10}{\}rm Gestion}$ et Impacts du Changement Climatique
temps sur la Picardie, choisie comme zone-test. Ce travail va être poursuivi à l'échelle de la France puis de l'Europe. Il a pour but d'analyser l'impact de scénarios de changements climatique et de politique agricole futurs sur l'affectation des terres agricoles simulée par AROPAj. En réponse aux scénarios d'utilisation du sol qui en résultent ORCHIDEE-STICS simulera l'évolution de la productivité des cultures et des bilans environnementaux. Ces variables pourront rétro-agir sur les choix politiques et idéalement à terme sur le changement climatique [Thèse d'Elodie Debove, 2007, et collaboration avec Paul Zakharov et David Leclere].

• Comment l'historique d'une surface influence-t-il ses flux de CO₂ actuels?

Sur plusieurs sites de Sibérie, ORCHIDEE-STICS est utilisé pour analyser les effets de l'abandon des cultures (PFT cultures en C3 d'hiver) et le retour aux prairies (PFT herbacées naturelles en C3) à une période plus ou moins récente sur les flux et stocks de carbone du sol [Vuichard *et al.*, en révisiona,e]. Des mesures de flux sont disponibles pour l'évaluation des variables simulées [Belelli Marchesini *et al.*, 2007].

A l'image de cette dernière utilisation originale mais ponctuelle d'ORCHIDEE-STICS, l'application du modèle pourrait être étendue à la fois dans l'espace et dans le temps. Ma thèse a porté sur une petite région d'Europe et sur une période courte caractérisée par la variabilité inter-annuelle récente (trois dernières décennies) sans considérer d'évolution dans les surfaces cultivées ni dans leur gestion.

• Les résultats obtenus avec ORCHIDEE-STICS sur L'Europe sont-ils transposables à d'autres régions du monde ?

ORCHIDEE-STICS et sa représentation en trois types agricoles pourra être testée sur le reste de l'Europe, par exemple la fenêtre $-15^{\circ}E$ à $60^{\circ}E$, $30^{\circ}N$ à $75^{\circ}N$ étudiée dans le cadre du projet CarboEurope et de l'étude de Vetter *et al.* [2007], voire encore plus à l'Est. Le modèle serait aussi théoriquement applicable à d'autres zones de cultures tempérées comme aux Etats-Unis, où la collaboration avec l'équipe développant AGRO-IBIS (approche mentionnée en section 0.2.2 de l'introduction) serait certainement bénéfique aux deux approches. Ces extensions permettraient de poursuivre l'amélioration de la phénologie et productivité simulées et de quantifier la contribution des surfaces cultivées au bilan de carbone à une plus grande échelle.

• Quel est le rôle des tendances agronomiques et climatiques passées et futures sur la productivité et les émissions ou le stockage de carbone dans la biosphère continentale?

Des simulations à l'échelle du siècle passé et futur nécessiteraient la prise en compte de l'évolution des surfaces cultivées et des pratiques culturales, dont on a évoqué en introduction la rapidité et les implications environnementales. Ces applications imposent de disposer de jeux de données appropriés ou, en leur absence, d'émettre des hypothèses pour tenter de générer l'information manquante. Gervois et al. [2008] ont simulé pour le blé et le maïs en France, l'impact des tendances à l'augmentation des indices de récoltes, de la fertilisation, de l'irrigation et dans le choix des variétés sur la productivité. Ils ont montré la prédominance de l'effet de ces facteurs par rapport à l'augmentation de la température et de la concentration en CO₂ atmosphérique sur le XX^{ème} sciècle. En étudiant le maïs et le soja aux Etats-Unis, Lobell & Asner [2003] ont trouvé un effet physiologique direct négatif de la tendance croissante des températures récentes sur les rendements mais un effet positif prépondérant de l'adaptation des pratiques au changement climatique. Bien comprendre l'influence de chaque facteur (et de leur interaction) dans le passé permettra de mieux prévoir l'effet de leur évolution dans le futur. Du point de vue des pratiques agricoles, Bondeau et al. [2007] (en Annexe B) ne prennent pas en compte l'évolution de la fertilisation et des variétés sur le dernier siècle à l'échelle globale, seule l'irrigation varie dans ces expériences. Ils estiment une émission de carbone dûe au changement d'utilisation des sols qui est proche des estimations de Houghton [2003] et à l'intérieur de la fourchette des autres estimations de la littérature pour les dernières décennies [Schimel et al., 2001; House et al., 2003].

Les progrès accomplis par les autres groupes en parallèle de cette thèse (mentionnés en introduction, section 0.2.2) montrent l'intérêt de la communauté pour le type de travaux que j'ai présentés. Arneth et al. [in prep.] proposent une revue des avancées récentes dans le domaine de la modélisation des cultures à grande échelle et des changements d'utilisation des sols. L'intercomparaison des modèles de biosphère intégrant les cultures serait une façon de faire le point, trois ans après la première rencontre qui avait pour but de confronter les approches méthodologiques, les objectifs et les difficultés de chacune. Les modèles seraient maintenant prêts à suivre un protocole commun dans les grandes lignes. La phénologie, la productivité ainsi que les variables du bilan d'eau et de carbone pourraient être évaluées collectivement. Les simulations d'ensemble permettraient de donner une idée de l'incertitude autour des estimations par les différents modèles. Les émissions de CO₂ dûes aux changements régionaux (et globaux) d'utilisation des sols et aux choix de gestion ou les changements de productivité causés par les évènements extrêmes pourront être analysés et comparés dans cette approche multi-modèles. Les études multi-modèles précédentes des effets des changements de couverture végétale sur le cycle du carbone [McGuire et al., 2001; Cramer et al., 2004] n'incluaient pas de représentation de l'agriculture.

Dans le cadre du deuxième axe de la poursuite de la prise en compte des surface cultivées dans ORCHIDEE, on s'oriente vers une **approche globale**. Le développement de la représentation des surfaces cultivées tempérées est complémentaire d'autres travaux au sein de la composante "surfaces continentales" du modèle couplé de l'IPSL. De nouvelles catégories de surfaces gérées par l'Homme sont représentées (prairies [Vuichard, 2005] et forêts gérées [Thèse de Valentin Bellassen], cultures tropicales [Thèse d'Alexis Berg]), et de nouveaux cycles biogéochimiques auxquels participent potentiellement les cultures sont introduits (azote Post-Doctorat de Sönke Zaehle], CH₄ [Thèse de Bruno Ringeval]). L'idée est maintenant d'intégrer directement et de façon cohérente dans le modèle de biosphère les enseignements tirés des études menées avec les modèles hétérogènes (STICS, PaSim¹¹, SARRA¹²). En effet, il y a des limites évidentes à l'application de ces modèles à grande échelle dont ce n'a pas été l'objectif de développement, et la multiplicité des couplages au sein de la composante biosphère du modèle de climat de l'IPSL n'est pas souhaitable. En vue de simulations climatiques globales, ce n'est plus une approche telle qu'ORCHIDEE-STICS que l'on conseille. La nouvelle approche sans couplage exogène pourrait tirer parti de l'expérience de Bondeau et al. [2007] en matière de représentation des surfaces cultivées à l'échelle globale.

L'objectif à long terme de l'amélioration de la représentation des **cultures** dans le modèle de climat de l'IPSL, est de pouvoir quantifier leur **contribution aux rétro-actions** du système. On a contribué dans cette thèse à quantifier régionalement l'influence des cultures sur les émissions de CO₂. Cependant, pour participer à l'élaboration de **scénarios de changement climatique regional futur**, il est nécessaire de quantifier leur impact sur les propriétés biophysiques de la surface et sur la circulation atmosphérique qui en dépend. Les diverses expériences numériques de déforestation visant à explorer l'impact des changements de couverture végétale sur le climat passé [Brovkin *et al.*, 1999; Govindasamy *et al.*, 2001; Bounoua *et al.*, 2002; Feddema *et al.*, 2005b, e.g.,] ou futur [DeFries & Eshleman, 2004; Feddema *et al.*, 2005a, e.g.,] étaient basées sur une représentation très simpliste des sufaces cultivées. Dernièrement, Davin *et al.* [2007] ont étudié (sur la base de cette même simplification) l'**effet biophysique** global et régional des changements d'occupation du sol sur le climat passé et futur avec ORCHIDEE en mode couplé au modèle de climat de l'IPSL. Un des buts de la suite de mon travail consiste à converger avec ces travaux [Davin, 2008] Ma thèse a focalisé sur les effets biogéochimiques, la thèse parallèle n'a

¹¹Pasture Simulation model

¹²Système d'Analyse Régionale des Risques Agro-climatiques

pas disposé d'une représentation améliorée des surfaces cultivées. [Davin, 2008].

Avec une représentation améliorée des surfaces cultivées comme ORCHIDEE-STICS, on suppose que le modèle tendrait à :

- accentuer les effets "refroidissants" d'une déforestation *via* une augmentation de l'albedo en hiver dûe au sol nu potentiellement couvert de neige, et à
- minimiser les effets "réchauffants" *via* une augmentation de la rugosité et de l'évapotranspiration par rapport aux simples herbacées.

D'après Betts [2001], c'est l'effet de l'albedo qui est prépondérant dans les moyennes latitudes comme l'Europe. Lobell *et al.* [2006] montrent, à partir de tests de sensibilité du modèle de surface CLM¹³ à l'irrigation, au non-labour, au LAI et à l'interculture, que les pratiques culturales peuvent avoir un effet significatif sur le climat régional et global, en plus de l'effet mieux documenté du changement de couverture végétale en faveur de l'agriculture. Le non-labour refroidit la surface en empêchant la diminution de l'albédo, tandis que l'irrigation peut diminuer l'albedo du sol en été. Ces résultats encouragent à tenir compte non seulement des effets biogéchimiques (stockage de carbone) mais aussi biophysiques des pratiques agricoles, sur le climat régional et global.

¹³Community Land Model

Annexe A

EOS Meeting report : "Advances in Large-Scale Crop Modeling"

La réunion qui s'est tenue en Mars 2005 au Rothamsted Research Centre (Harpenden, Royaume-Uni) a permis de faire un premier point sur les avancées en matière de modélisation régionale et globale des cultures au sein de la biosphère. Le court article qui suit en fait un bilan. J'y ai présenté l'approche ORCHIDEE-STICS, basée sur les travaux initiaux de Gervois *et al.* [2004] et De Noblet-Ducoudré *et al.* [2004]. L'approche LPJmL à laquelle j'ai participé avant cette thèse était représentée par Alberte Bondeau. L'article Bondeau *et al.* [2007] figure en annexe B.

MEETINGS

Advances in Large-Scale Crop Modeling

PAGES 245, 247

Intensified human activity and a growing population have changed the climate and the land biosphere. One of the most widely recognized human perturbations is the emission of carbon dioxide (CO_2) by fossil fuel burning and land-use change. As the terrestrial biosphere is an active player in the global carbon cycle, changes in land use feed back to the climate of the Earth through regulation of the content of atmospheric CO_2 , the most important greenhouse gas, and changing albedo (e.g., energy partitioning).

Recently, the climate modeling community has started to develop more complex Earthsystem models that include marine and terrestrial biogeochemical processes in addition to the representation of atmospheric and oceanic circulation. However, most terrestrial biosphere models simulate only natural, or so-called potential, vegetation and do not account for managed ecosystems such as croplands and pastures, which make up nearly one-third of the Earth's land surface.

On the other hand, over the past 30 years numerous models of crop growth have been developed, and these have proved to be extremely useful tools for scientists and managers of agricultural systems. These detailed models, though, are typically application-orientated and therefore usually are applied specifically to particular crops and locations. These models were not originally designed for largescale studies and do not include complete nutrient or carbon cycles. Though, the models can provide useful information for large-scale crop modeling, which then has to be adapted for use in terrestrial biosphere models.

A workshop held at the Rothamsted Research Centre, Harpenden, U.K., dealt with the advancing science of including large-scale, generic crop modeling schemes in global terrestrial biosphere models. About 20 scientists from the crop modeling and global biosphere modeling community attended. The workshop was one in a series of workshops sponsored by Quantifying and Understanding the Earth System (QUEST), a program of the U.K. Natural Environment Research Council (NERC). QUEST has several activities, among them the focused strategic activity on Earth system modeling and two research themes: (1) the contemporary carbon cycle and its interactions with climate and atmospheric chemistry, and (2) the implications of global environmental changes for the sustainable use of resources

Setting the Scene

The modeling of crop productivity and yields on a global scale requires information

Eos, Vol. 86, No. 26, 28 June 2005

on current and previous land cover, land-use practices, and changes in land management over time. For the past, this has been done using a combination of census data on cropland inventories and land cover classification from satellite data. This "statistical data fusion" can produce a calibrated map of croplands.

By using a "hindcast modeling" approach (combining a land cover change model with historical cropland inventory data), Navin Ramankutty and colleagues at the University of Wisconsin-Madison Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE) extended the 1992 cropland map back to the year 1700. Recently, SAGE has produced global data sets of the early 1990's distribution of 18 major crop types at a spatial resolution of approximately 10 km. SAGE is continuing its work to derive global maps of present crop types, planting and harvest dates, fertilizer application rates, and irrigation water application rates. All of these data are useful drivers for modeling crops.

While much uncertainty surrounds future agricultural land use and farmer adaptation to climate change, alternative scenarios of future management can be used to drive crop models during the 21st century Frank Ewert and colleagues at Wageningen University in The Netherlands and Université catholique de Louvain in Belgium have developed such quantitative and spatially explicit scenarios of future agricultural land use across Europe. They constructed future agricultural land-use locations for three time slices (2020, 2050, and 2080) at a spatial resolution of 10-min latitude and longitude. The scenarios were based on an interpretation of the four story lines of the Special Report on Emission Scenarios (SRES) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) using a simple supply and demand model of agricultural area quantities at the European scale, and these quantities were disaggregated using scenario-specific, spatial allocation rules.

Assumptions about future technological advancement and estimated changes in crop productivity have significant impacts on future agricultural land use in Europe. If technology continues to progress at current rates, then cropland and grassland areas may decline by as much as 50%. As a result, a large area of agricultural land in Europe could be used for other purposes. Expansion of urban areas, and specific management for bioenergy crops, forests, and recreation are possible alternative land uses for the future.

Different Modeling Strategies

Six different groups representing five different models presented modeling approaches that are currently implemented. The five models are: Lund-Potsdam-Jena, LPJ; Integrated Biosphere Simulator, IBIS; Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems, ORCHIDEE; General Large Area Model, GLAM; and DayCent. Most of the groups have extended their original terrestrial ecosystem models to include the representation of crop growth, but have kept the representation of biophysical processes identical to the original model formulation where possible (e.g., photosynthesis, respiration, and hydrology). Many of the models have been extended by new algorithms for crop management (hybrid selection, planting and harvesting date, irrigation, fertilization, and intercropping and multiple cropping), crop phenology, growth, and carbon allocation.

The models differ mainly in terms of which crop types are represented and also in terms of the detail of processes, which can vary substantially across models. For example, the most detailed models (for applications on a continental scale) include definitions of growth stages (planting to leaf emergence, leaf emergence to the end of silking, and grain fill to physiological maturity) and nitrogen availability (atmospheric deposition, fixation, fertilizer application, and mineralization of soil organic matter). Usually, the major crop types-such as maize soybeans wheat and rice-are incorporated; however, it is an open question about the choice and number of cultivars, which are needed for large-scale, generic crop modeling.

The group at the Potsdam Institute for Climate Impact Research implemented so-called crop functional types (CFTs) to model the phenology and growth of the world's dominant crop or rangeland types within LPJ. The natural vegetation, represented by plant functional types (PFTs), and CFTs can coexist within a mixed grid cell on two different land cover types. PFTs are all mixed within the "natural" land cover and compete for resources, whereas each CFT is located on a distinct stand with its own water budget within the "agricultural" land cover. According to the climate, the model estimates several variety-specific parameters in order to ensure that the crop that is simulated represents the type most likely used by the farmers in that specific environment. Consequently, the model simulates the adaptation by selecting appropriate varieties across the climatic zones and with climate change.

For researchers at the Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, Giv-sur-Yvette, France), the mosaic approach is used to allow crops and natural vegetation to coexist within each grid point. In the presence of crops, ORCHIDEE, the French global dynamic vegetation model, permanently assimilates some output from the Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures Standard (STICS), a realistic agronomy model, to correct for some of the variables that are specific to cultivated plants (e.g., leaf area index, root profile, canopy height, irrigation, and nitrogen stress). This strategy has been implemented for three cultivars: wheat, maize, and soybeans.

Similarly, at the University of Reading, GLAM, which adapts traditional crop modeling approaches to operate on larger spatial scales, has been incorporated into the land surface scheme of the U.K. Met Office climate model to examine the two-way biophysical interactions between crops and their climate.

Currently, all of the models are at about the same development state of having been tested and validated at some specific sites, and all are producing their first results. IBIS has been applied across the Mississippi Basin to investigate the influence of land cover and land-use changes on nitrate export to the Gulf of Mexico, and how climate change and variability may have previously affected crop yields and farmer decision-making. DayCent and LPJ have been applied globally and tested against country data from the Food and Agricultural Organization (FAO) of the United Nations.

One major outcome of this workshop was the agreement to create a data set consisting of all the necessary information (climate, planting and harvesting date, phenology, fertilizer application, irrigation application, yield, carbon, and water and energy fluxes) for validating and driving these hybrid crop-terrestrial ecosystem models.

The creation of this data set involves the collection of the data from various sources as well as quality control of the data (assuring that the same quantities from different sources really mean the same) and the creation of common forcing fields with respect to the different data needs of the different models. This data set, if combined with a standardized modeling protocol, can then also be used for a future modeling intercomparison project. Ideally, this data set should comprise observations on a field scale, and also across larger spatial and temporal scales using available census data. There are various existing data sources such as the FAO data set and other national and subnational statistics as well as remote sensing data, the Global Change and Terrestrial Ecosystems (GCTE) Focus 3 (Agroecology and Production System) networks, FLUXNET, Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) experiments, and field observations at the farm level (e.g., the Farm Accountancy Data Network in Europe).

The workshop, "Large Scale, Generic Crop Modelling," was held 9–11 March 2005 at Rothamsted Research Centre, Harpenden, U.K. More information on the workshop, models, and the participants can be found on the QUEST Web site: http://quest.bris.ac.uk/ workshops/crop/index.html.

--MARKO SCHOLZE, QUEST, University of Bristol, U.K.; ALBERTE BONDEAU, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e.V., Potsdam, Germany; FRANK EWERT, Wageningen University, Netherlands; CHRIS KUCHARIK, SAGE, University of Wisconsin-Madison; JÖRG PRIESS, University of Kassel, Germany; and PASCALLE SMITH, LSCE, Gif-sur-Yvette, France

Annexe B

Article publié dans *Global Change Biology* (Mars 2007)

"Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance" Global Change Biology (2007) 13, 679-706, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x

Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance

ALBERTE BONDEAU*, PASCALLE C. SMITH*¹, SÖNKE ZAEHLE*¹, SIBYLL SCHAPHOFF*, WOLFGANG LUCHT*, WOLFGANG CRAMER*, DIETER GERTEN*, HERMANN LOTZE-CAMPEN*, CHRISTOPH MÜLLER*§, MARKUS REICHSTEIN*† and BENJAMIN SMITH‡

*Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Telegrafenberg, PO Box 601203, D-14412 Potsdam, Germany, †Department of Forest Environment and Resources, DISAFRI, University of Tuscia, I-01100 Viterbo, Italy, ‡Department of Physical Geography and Ecosystems Analysis, Geobiosphere Science Centre, Lund University, S-223 62 Lund, Sweden, §International Max Planck Research School on Earth System Modelling, Bundesstr. 53, 20146 Hamburg, Germany

Abstract

In order to better assess the role of agriculture within the global climate-vegetation system, we present a model of the managed planetary land surface, Lund-Potsdam-Jena managed Land (LPJmL), which simulates biophysical and biogeochemical processes as well as productivity and yield of the most important crops worldwide, using a concept of crop functional types (CFTs). Based on the LPJ-Dynamic Global Vegetation Model, LPJmL simulates the transient changes in carbon and water cycles due to land use, the specific phenology and seasonal CO₂ fluxes of agricultural-dominated areas, and the production of crops and grazing land. It uses 13 CFTs (11 arable crops and two managed grass types), with specific parameterizations of phenology connected to leaf area development. Carbon is allocated daily towards four carbon pools, one being the yield-bearing storage organs. Management (irrigation, treatment of residues, intercropping) can be considered in order to capture their effect on productivity, on soil organic carbon and on carbon extracted from the ecosystem. For transient simulations for the 20th century, a global historical land use data set was developed, providing the annual cover fraction of the 13 CFTs, rain-fed and/or irrigated, within 0.5° grid cells for the period 1901–2000, using published data on land use, crop distributions and irrigated areas. Several key results are compared with observations. The simulated spatial distribution of sowing dates for temperate cereals is comparable with the reported crop calendars. The simulated seasonal canopy development agrees better with satellite observations when actual cropland distribution is taken into account. Simulated yields for temperate cereals and maize compare well with FAO statistics. Monthly carbon fluxes measured at three agricultural sites also compare well with simulations. Global simulations indicate a \sim 24% (respectively \sim 10%) reduction in global vegetation (respectively soil) carbon due to agriculture, and 6-9 Pg C of yearly harvested biomass in the 1990s. In contrast to simulations of the potential natural vegetation showing the land biosphere to be an increasing carbon sink during the 20th century, LPJmL simulates a net carbon source until the 1970s (due to land use), and a small sink (mostly due to changing climate and CO₂) after 1970. This is comparable with earlier LPJ simulations using a more simple land use scheme, and within the uncertainty range of estimates in the 1980s and 1990s. The fluxes attributed to land use change compare well with Houghton's estimates on the land use related fluxes until the 1970s, but then they begin to diverge, probably due to the different rates of deforestation considered. The simulated impacts of agriculture on the global water cycle for the 1990s are \sim 5% (respectively \sim 20%) reduction in transpiration (respectively

Correspondence: Alberte Bondeau, tel. +49 331 288 2546, fax +49 331 288 2600, e-mail: Alberte.Bondeau@pik-potsdam.de

Authorship after Lucht is alphabetical.

¹Present address: Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Orme des Merisiers, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

© 2007 The Authors Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd

interception), and $\sim\!44\%$ increase in evaporation. Global runoff, which includes a simple irrigation scheme, is practically not affected.

Keywords: agriculture, crop functional type, global biogeochemistry

Received 21 March 2006; revised version received 4 October 2006 and accepted 5 July 2006

Introduction

Agriculture profoundly affects global carbon, water and nutrient cycles, as well as the planetary surface energy balance (Feddema et al., 2005; Foley et al., 2005). Accounting for croplands, pastures and rangelands, nearly 50% of the potentially vegetated land surface has been affected by agriculture (from Foley et al., 2005). The global cropland area increased from $\sim 4 \times$ 10^6 km^2 in 1700 to $\sim 18 \times 10^6 \text{ km}^2$ in the 1990s, but $\sim 2 \times 10^6 \,\mathrm{km^2}$ were abandoned in the same period of time (Ramankutty & Foley, 1999). Both clearing and abandonment of agricultural land use is continuing in many places. Earth system-wide feedbacks from this perturbation have been identified (e.g. Avissar & Werth, 2005; Gordon et al., 2005), which may affect the stability of the climate system in the future - but they are at present incompletely quantified and may imply nonlinear features in time or space.

Spatially explicit global parameterizations of land used for agriculture have been produced for the estimation of biophysical and biochemical features such as land surface albedo, energy balance, roughness, greenhouse gas (GHG) emissions, crop yields and carbon stocks. Differences in albedo and surface roughness between natural and cultivated vegetation alter atmospheric circulation, temperature and rainfall in coupled vegetation-climate modelling experiments (Xue, 1996; Bonan, 1999; de Noblet-Ducoudré et al., 2000; Betts, 2001; Brovkin et al., 2004, 2006). Global vegetation models running under historical or future climate scenarios generally show deforestation as generating enhanced carbon emission to the atmosphere, while regrowth is sequestering carbon (e.g. McGuire et al., 2001; Brovkin et al., 2004; Cramer et al., 2004; Levy et al., 2004). In these experiments, agricultural land use is usually described simply as harvest of a biomass fraction or as a replacement of forests by grasslands. Actual crops differ from grasslands, however, with respect to phenology and biogeochemical cycling. Land management (irrigation, fertilization, straw and residue processing, tillage/no tillage, etc.) alters the physical land surface and biogeochemical cycles, causing feedbacks to the climate (Boucher et al., 2004; Lal, 2005; Ogle et al., 2005). There are examples where land is managed purposefully towards atmospheric effects, in order to enhance carbon storage (Leahy et al., 2004).

Planetary food production capacity has been estimated with global crop yield models (e.g. FAO, 1978; Fischer et al., 2002), which simulate the potential yield of major crops as a function of soil and climate. Actual yields are derived from potential ones through a 'management factor' based on FAO statistics. This method is used (e.g. by the integrated Earth system model IM-AGE2, IMAGE team, 2001) to assess land use change in a context of climatic, demographic and socioeconomic change. In order to improve the representation of feedback mechanisms between crop biogeochemistry and climate, crop models with process-based representation of important biogeochemical cycles are now being used in several global assessments (e.g. EPIC, Tan & Shibasaki, 2003; or DayCent, Parton et al., 1998; Stehfest et al. manuscript in preparation). Some large-scale crop models are being especially designed for this purpose (Challinor et al., 2004, 2006).

In order to integrate agriculture into a comprehensive land biosphere model, Kucharik & Brye (2003) have added crop process modules to IBIS (Foley *et al.*, 1996), using algorithms from the EPIC crop growth model (Williams *et al.*, 1989). The resulting Agro-IBIS model simulates climate and management effects on biogeochemistry, as well as yields for maize and soybean in the United States (Donner & Kucharik, 2003; Kucharik, 2003). Gervois *et al.* (2004) have coupled the crop model STICS (Brisson *et al.*, 2003) to the land biosphere model ORCHIDEE (Krinner *et al.*, 2005). The resulting ORCH-IDEE–STICS model improves the seasonal dynamics of the biophysical parameters of the land surface and biogeochemical cycles for wheat and maize in Western Europe (de Noblet-Ducoudré *et al.*, 2004).

These approaches share the property that they are either static (prescribed spatial properties of agriculture), are derived from computations of potential natural vegetation or grass (i.e., use a crop proxy), or link the separate modelling philosophy of crop production models into the respective land surface model. In contrast, we derive a biogeochemically consistent dynamic and flexible, parameter-scarce representation of global agriculture from the concept of plant functional types for inclusion in a Dynamic Global Vegetation Model (DGVM, Prentice et al., 2006). DGVMs were initially developed to investigate the role of the terrestrial biosphere within the global carbon cycle, including climate feedbacks, considering potential rather than actual vegetation. They simulate the spatial and temporal dynamics of generic plant functional types (PFTs; tree/grass, evergreen/deciduous, broadleaf/evergreen,

etc.), as well as of important ecosystem functions (net primary production, heterotrophic respiration, evapotranspiration, runoff, etc.), making them suitable for broad-scale assessments in any biome (Cramer *et al.*, 2001). Importantly, DGVMs allow the assessment of direct and indirect (climatic) effects of CO₂ enrichment on plant growth.

In addition to natural PFTs, we implement generic crop functional types (CFTs). CFTs are generalized and climatically adapted plant prototypes designed to capture the most widespread types of agricultural plant traits. Although they contain specific new functional formulations related to the development of yield-bearing organs, CFTs are directly compatible to PFTs for potential natural vegetation. Our approach permits the simulation of transient impacts of expanding (or declining) global agricultural areas on the terrestrial carbon and water cycles, here on the basis of the well-established Lund-Potsdam-Jena-DGVM (LPJ-DGVM; Sitch et al., 2003). Natural and agriculturally perturbed vegetation are simulated within the same biogeochemically consistent numerical framework. The annual land fractions occupied by different crops, natural or abandoned vegetation can be varied dynamically on the basis of land use. As we represent the global biosphere under human influence, we call this model version LPJmL ('LPJ managed Land'). The version presented here focuses on agricultural and grazing land only, without forest management.

The development of LPJmL serves two major purposes. First, it addresses nonlinear biophysical and biogeochemical features of continuing large-scale replacement of natural vegetation by agroecosystems, under CO₂ increase and climate change. Second, human societies worldwide make substantial economic and cultural use of ecosystem services (food, fibre and energy crops, but also climate regulation, water purification, etc.) – but the assessment of their future provision is still in an early stage (Alcamo *et al.*, 2005). LPJmL is designed for the consistent quantification of multiple drivers (climate, CO₂, land management, land use change) on the future provision of these services.

In this paper, we describe and demonstrate LPJmL by investigating the impact of agriculture on the global carbon and water cycles in the 20th century, using historical climate and land use data, and by analysing presentday performance against selected benchmarking data.

Material and methods

A generic model for the world's arable and managed grassland ecosystems

A considerable range of simulation results from LPJ has been successfully compared with observations, such as the monitored seasonal cycle of atmospheric $[CO_2]$ (Sitch *et al.*, 2003; Zaehle *et al.*, 2005), the interannual variability in atmospheric $[CO_2]$ growth rate (Prentice *et al.*, 2000; Peylin *et al.*, 2005), the interannual variations in vegetation activity at high northern latitudes (Lucht *et al.*, 2002), the runoff of major river catchments (Gerten *et al.*, 2004b) and soil moisture (Wagner *et al.*, 2003). This enhances our confidence in the representation of the coupled carbon and water cycles within LPJ for natural vegetation. We adapt LPJ to include those dynamics of croplands and grazing lands that are of relevance at the global to continental level.

As an alternative to the detailed parameterizations of agricultural crop cultivars used in crop production models (e.g. STICS, Brisson et al., 2003), which are difficult to apply on the global and century scales, we develop a 'CFT' concept, which is analogous and compatible to the 'PFT' concept used by LPJ and other biosphere models. Following, LPJmL can be used to estimate changes in basic stocks and fluxes of carbon and water, caused by land use, such as net primary productivity (NPP), net biome productivity (NBP), heterotrophic respiration (R_h) and evapotranspiration. In order to cover the major types of plants existing in agricultural ecosystems (arable crops and managed grasslands) worldwide, 13 CFTs were added, all sharing the fundamental biophysical and physiological functions of natural PFTs, but with additional specific agro-ecosystem-oriented functions and/or parameters (Table 1).

CFTs correspond to particular crops/grasses, or groups of crops with broadly similar functions. They do not mimic one specific cultivar of a crop, because this would limit the applicability of the model to only those sites where this cultivar exists, and because including all existing cultivars into the framework of a global model is impossible. To nevertheless account for variety-dependent plasticity, variety-specific crop characteristics (e.g. summer vs. winter cultivars, heat requirements) are determined internally to reflect the selection of an 'optimal' variety under the given local circumstances. Pastures and rangelands are represented by two basic grass CFTs, C3- and C4-managed grasses. In contrast to PFTs, a daily carbon allocation scheme is used for CFTs, in order to better capture the environmental and management influence on crop development and yield (see 'Crop development and growth').

Spatio-temporal arrangement of land cover types within a spatial unit

In agricultural landscapes, fields are separated from each other, usually containing a single crop only. LPJmL uses a number of distinct land segments: one natural

© 2007 The Authors

Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd, Global Change Biology, 13, 679-706

IaDIE I FEATURES/ PA	rameters of LFJML P	or pnenotogy and grow	un or CF IS						
	Local adaptation:		Base	Phenological	Vernalization			Optimum* harvest	Minimum [‡]
CFTs (other than managed grass)	sowing date and cultivar parameters	Sowing date <i>sdate</i> (Julian day)	temperature Tb (°C)	heat units <i>phu</i> (°C day)	needs <i>pvd</i> (days), <i>trg</i> (°C)	Maximal LAI LAI _{max}	Irrigation priority	index at harvest hi _{opt} (0–1)	harvest index at harvest hi _{min} (0–1)
Temperate cereals (wheat, barley, rye, oat)	sdate, phu, pod	f(<i>temp</i>) <i>wt</i> 12 °C; <i>st</i> 5 °C N:(270–60); S: (85–240) init: N: 330: S: 150	0	f(sdate) (1500–2500)	f(<i>sdate</i>) (0–60) (<i>trg</i> : 12 °C)	f(fert) (3–7)	æ	0.4	0.2
Rice	double cropping in tronical Asia	First cycle fixed: N: 120: S: 200	10	single 1600 double 1500	No	IJ	1^{\ddagger}	0.5	0.25
Maize	sdate, Tb	f(temp, prec) st 14 °C; pp10 init- N: 140. S: 320	f(<i>sdate</i>) (5–15)	1600	No	f(fert) (3–7)	7	0.5	0.3
Tropical cereals	sdate	f(prec) pp10	10	1500	No	2.5	7	0.25	0.01
(millet, sorghum)		init: N: 150; S: 330							
Pulses (lentils)	No	Fixed N: 100; S: 280	3	2000	No	4	9	0.6	0.01
Temperate roots (sugar beet)	No	Fixed N: 90; S: 270	б	2700	No	IJ	5	2 ^{\$}	1.1 ^{\$}
Tropical roots	sdate	f(prec) pp10	20	2000	No	ß	11	2 ⁸	1.1 [§]
(cassava)		init: N:100; S: 280							
Sunflower	sdate, phu	f(temp) st 15°C	6	f(sdate)	No	3	4	0.3	0.2
		init: N:120; S: 300		(1000 - 1600)					
Sovbean	No	Fixed N: 140: S: 320	10	1000	No	3	3	0.3	0.01
Groundnuts	sdate	f(prec) pp10	14	1500	No	4	10	0.4	0.3
		init: N: 140; S: 320							
Rapeseed	sdate, phu, pvd	f(temp) wt 17 °C; st 5 °C	0	f(sdate)	f(sdate) (0-60)	4.5	6	0.3	0.15
4		N: (180–60); S: (0–240)		(1700-2900)	(<i>tro</i> : 12 °C)				
		init: N: 300; S: 120) 				
sdate, sowing date (N temperature for verna initialization (default	J, northern hemisph dization; LAI _{max} , may value). For sowing dı	ere; S, southern hemisp ximum LAI; hi _{opt} , harvee ates estimations based o	ohere); <i>Tb</i> , base st index optimu n temperature,	e temperature; ım; hi _{min} , harvı f(<i>temp</i>), <i>w</i> t ano	<i>phu,</i> phenolog est index minim l <i>st</i> are the autu	ical heat units; num; <i>temp</i> , temp mm (respective)	<i>pvd,</i> verna erature; <i>pre</i> ly spring) te	lization requiremen c, precipitation; fert, emperature threshol	tts; <i>trg</i> , threshold , fertilization; init, ds considered for
winter (respectively s world, 110 mm in trof	oring) types. For sowi pical Asia. For maize	ing date estimations base T^{1} is a function of the	ed on precipitat sowing date, f	ion, f(<i>prec</i>), <i>pp</i> 1 (<i>sdate</i>). For ten	0 is the total pro-	scipitation requi and maize, LAI	ired during _{max} is a fun	the last 10 days: 40 r ction of the fertilize	nm all around the er use, f(<i>fert</i>). Init:
initialization (default Notes:	value). If not modifie	ed by LPJmL, values of	Tb, LAI _{max} , hi _{oi}	_{pt} hi _{min} , are ta	ken from Neits	ch <i>et al.</i> (2002).			
*No water stress									
*Severe drought condi	itions:								
[‡] Rice is always irrigat	ed;								
^s The harvest index is	higher than 1 for bel	lowground storage orga	ns.						
LPJmL, Lund-Potsdaı	m–Jena managed Laı	nd; CFT, crop functional	type.						

^{© 2007} The Authors Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd, Global Change Biology, **13**, 679–706

segment, where LPJ is run without further modifications (natural PFTs and barren land coexist in a homogeneous mixture), and one to 26 (see 'Input data') managed segments, where LPJmL simulates the phenology and growth of each individual CFT. All fluxes and pools are updated independently for each segment, although all share the same macroclimate and soil texture for the grid cell. Management, such as irrigation, is applied for the appropriate segments only.

Land use change (prescribed from historical reconstructions or scenarios) affects the relative size of the segments in each grid cell on an annual time scale (Zaehle, 2005). Expanding agricultural land removes natural vegetation. Abandoned agricultural land is added to the natural segment and immediate recolonization occurs following the establishment rules in LPJ. The accounting of carbon in the biosphere in response to changing land use follows McGuire *et al.* (2001), adapted by Zaehle *et al.* (2005): for agricultural expansion, the root biomass of the removed vegetation increases the litter pool, while the removed aboveground biomass is allocated to two carbon pools which are returned to the atmosphere with turnover times of 1 year (67%), and 25 years (33%). To simulate crop rotations, soil and litter carbon pools of new and existing agricultural land are mixed after harvest. For abandoned land, new vegetation is immediately mixed proportionally with the natural segment of the grid cell; soil and litter carbon pools are added to the corresponding pools. Figure 1 illustrates the fluxes between the different carbon pools.

Crop development and growth

All crops considered in LPJmL have annual life cycles or are harvested within 1 year, controlled by climate



Fig. 1 Carbon pools and carbon fluxes simulated by Lund–Potsdam–Jena managed Land. Gross primary production (GPP), autotrophic respiration (R_a), net primary production (NPP) are computed separately for each plant functional type (PFT) and crop functional type (CFT). Carbon pools are vegetation (four different pools for natural vegetation and four for agriculture), litter, soil and human 'harvested' products. Natural vegetation and agriculture occupy distinct parts of the grid cell, yearly fractions are provided by land use. Product pools result from the regular human appropriation of organic material from agricultural areas, and eventually from land use change. The figure illustrates the case where a part of the natural fraction is converted to agriculture (see the limits at year *y* and at year *y* + 1), implying carbon emission (fires + logging) and changes in the amount of carbon of the litter and soil pools of the agricultural area. Dotted arrays represent CO₂ fluxes, continuous arrays organic material. R_{h_r} heterotrophic respiration.

and human actions. In LPJ, growth is modelled using a combination of processes with daily time-steps (photosynthesis, respiration, evapotranspiration, applying a phenological scalar for seasonal variation), and processes with annual time-steps, in particular the allocation of photosynthates to various plant organs. Seasonal canopy development and the allocation of carbon to various organs in crops are crucial for yield, therefore, additional processes including daily allocation are taken into account for the CFTs. We base our implementation on concepts developed in the crop growth modelling of SWAT (Arnold et al., 1994), EPIC (Williams et al., 1989) and SWIM (Krysanova et al., 2000, 2005). The robust, process-based representation of the coupled CO₂ and H₂O exchanges in LPJ (Farquhar et al., 1980; Haxeltine & Prentice, 1996; Gerten et al., 2004b) is maintained in LPJmL. In contrast, many crop models reduce the potential crop-specific light-use efficiency due to environmental factors using empirical relationships (e.g. Stockle et al., 1992, for EPIC).

Sowing date. In agricultural management, the phenological cycle is initiated by planting or sowing (for simplicity referred to as 'sowing' in the remaining text), on a date chosen by the farmer under essentially pedo-climatic constraints. Most crops have climatic requirements which limit sowing date options to only a part of the year, (e.g. winter cereals with vernalization requirements; Harrison et al., 2000). We model sowing date deterministically as a function of climate, assuming rational decisions by farmers, based on their recent experience, for crops that are grown in a broad range of temperate and/or tropical latitudes (maize, sunflower), are known to range from winter to spring types (temperate cereals, rapeseed), or are managed according to water availability (groundnuts, tropical cereals, tropical roots). Parameters for temperature and/or rainfall dependencies are listed in Table 1. Besides providing a realistic spatial distribution of sowing dates, this allows to represent a key aspect of adaptation of crop management to climate change.

Sowing dates determined by temperature are modelled on the basis of the 20 previous years' average date on which mean daily temperature falls under ('winter' types) or rises over ('spring' types) a CFT-specific threshold value determined empirically (Table 1). Temperate cereals and rapeseed are winter types, or summer types if the winter is too long, (e.g. at northern latitudes). As a result, temperate cereals are sown in LPJmL from the beginning of October (most 'winter' types) to the end of April (late 'spring' types) in the northern hemisphere, with differing subsequent phenological developments. Sowing date determined by water availability is modelled on the basis of the precipitation accumulated during the last 10 days (Table 1). For maize that grows in both temperate and tropical latitudes, temperature and/or precipitation thresholds are considered depending on latitude. Rice is assumed to grow twice per year in tropical Asia. Where no sowing-date climatic dependence could be established, a fixed sowing-date for each hemisphere is used (see fixed *sdate* in Table 1).

Phenology. Phenological development towards maturity is modelled using the heat unit theory (Boswell, 1926) by accumulating daily mean temperatures above a specific base temperature up to a maturity threshold. Instead of specific phenological phases (as in detailed crop models, e.g. Weir et al., 1984), we derive a phenological scalar increasing from 0 at sowing to 1 at maturity. We account for breeding or cultivar selection implicitly, assuming that the farmer will select the cultivar that is best adapted to the local pedo-climatic environment. For temperate cereals, rapeseed and sunflower, we determine the heat requirement, or phenological heat units (PHU), as a function of the sowing date, reflecting the length of the growing season. CFTs sown in relatively warm climate are modelled with higher heat requirements than in cooler climates. For temperate cereals or rapeseed, PHU is calculated from the fit of a quadratic curve to prescribed minimal and maximal PHU values that correspond to cultivars adapted to the coldest areas (earliest possible sowing date for winter crops or latest possible sowing date for spring crops) and to the warmest areas (winter sowing date). For sunflowers, PHU decreases linearly between a maximum value adapted to warm areas (early sowing date), and a minimum value adapted to cooler areas (late sowing date). The resulting variations of the PHU depending on the sowing date (i.e. on the climate) are shown in Fig. 2. For other CFTs, heat requirements are fixed, using standard values from the literature (Table 1). For temperate CFTs that benefit from winter dormancy (cereals and rapeseed), the vernalization requirement is also adjusted to the climate conditions (Table 1) and acts as a reduction factor on heat unit accumulation, slowing down progress on the phenological scale.

As for natural PFTs, the base temperature (T_b) for heat unit scheduling is the temperature value found to give the best linear fit of development rate to mean daily temperature. We use the values from SWAT (Neitsch *et al.*, 2002) for all CFTs (Table 1), except for maize where a large base temperature range is allowed and determined from the sowing date (Fig. 3), permitting cultivar differences between tropical (T_b 15 °C) and temperate maize (T_b 5 °C for the northern areas in northern hemisphere, i.e. the latest sowing dates).



Fig. 2 The relationship between sowing date and heat requirements for three crop functional types. PHU, phenological heat units; °Cd, degrees-days; temp. cs, temperate cereals. Monthly values correspond to the Northern hemisphere (a shift of 6 months must be applied for the Southern hemisphere).



Fig. 3 Base temperature for heat requirement calculation in maize as function of sowing date.

Leaf area, growth and carbon allocation. CFTs in LPJmL use a daily carbon allocation scheme, rather than the yearend annual scheme used for PFTs (Sitch *et al.*, 2003), for several reasons. First, allocation of photosynthates to the different organs depends on the whole crop cycle, which can extend over 2 different years. Second, multiple cropping may occur through two cycles with different climate and/or management, leading to different maximum leaf area index (LAI) levels. Third, allocation to the yield-bearing organ occurs only during the final part of the development, depending on LAI development during the entire growth cycle.

The daily fraction of photosynthetically active radiation (fPAR) absorbed by the canopy is computed

from daily LAI using Beer's law (Monsi & Saeki, 1953)

$$fPAR = 0.95(1 - e^{(k_l \times LAI)}),$$
 (1)

where k_1 is the light extinction coefficient, fixed here to 0.5.

Assuming that 50% of the solar radiation is photosynthetically active (Monteith, 1972), we compute absorbed PAR (APAR) from fPAR which drives gross assimilation through photosynthesis and evapotranspiration assuming a 'big-leaf' approach. We constrain the shape of the LAI growth curve, by using sigmoid and quadratic functions to parameterize the LAI variations during the growth and senescent phases, as in SWAT (Fig. 4). The optimal leaf area development curve during the growth phase is expressed as

$$fLAI_{max} = \frac{fPHU}{fPHU + e^{(l_1 - l_2 \times fPHU)}},$$
 (2)

where $fLAI_{max}$ is the fraction of the plant's maximum LAI corresponding to a given fraction of PHU, fPHU. l_1 and l_2 are two shape coefficients that are calculated from the fLAI and fPHU values at the first and second inflexion points on the leaf area development curve (see Table A4 of the SWAT User's Manual, Neitsch *et al.*, 2002). During the senescence phase, the LAI decrease of cereals, rapeseed and pulses follows the quadratic curve:

$$\begin{split} fLAI_{max} = & \frac{(1-fPHU)^2}{\left(1-fPHU_{sen}\right)^2} (1-fLAI_{max\ harvest}) \\ & + fLAI_{max\ harvest}, \end{split} \tag{3}$$

while that of all other CFTs follows:

$$fLAI_{max} = \frac{\sqrt{1 - fPHU}}{\sqrt{1 - fPHU_{sen}}} (1 - fLAI_{max harvest}) + fLAI_{max harvest}, \qquad (4)$$



Fig. 4 Leaf area development for selected crop functional type as fraction of maximum leaf area index under optimal conditions (non water-stressed). temp. cs, temperate cereals.

 \odot 2007 The Authors

where fPHU_{sen} is the fraction of the growing season at which the senescence starts, and fLAI_{max harvest} the fraction of crop maximal LAI still present at harvest. CFT-specific values are from SWAT (Neitsch *et al.*, 2002). Water stress reduces LAI growth directly, while temperature stress affects LAI growth through photosynthesis.

At sowing, photosynthesis in LPJmL starts on the basis of a small initial LAI supplied from seed reserves. The daily assimilation is allocated to four carbon pools: leaves, roots, harvestable storage organs (e.g. grains for cereals), and a pool representing stems and mobile reserves. The fraction of carbon assimilates entering each compartment is a function of heat unit accumulation (as in SWAT), adjusted for leaves and storage organs in case of water stress. At harvest, the biomass fraction of the storage organs is given by the harvest index (hi). The CFT-specific optimum and minimum (if water-stressed) hi are listed in Table 1. In case of water stress, leaf growth may not achieve the optimal LAI shape defined above, and the fraction of LAI_{max} reached at the peak of the canopy development will be lower than 1. On the other hand, leaf growth cannot exceed the value permitted by the LAI shape defined above, and extra assimilates are added to the unconstrained pool 'stems and mobile reserve'. Model runs for different CFTs under different environmental conditions show that the size of this unconstrained pool compares reasonably with the size of the other pools.

Maximum leaf area. A maximum LAI value, LAI_{max}, is prescribed for each CFT, which is reached under optimal climatic conditions. The values used in SWIM are generally higher than in SWAT, as SWIM is typically used for European intensive agriculture without nutrient limitations, where dense canopies are associated with high production. Using these values worldwide leads to overestimated yields in regions with more extensive management. Extensive management characterized by low fertilizer inputs leads generally to reduced canopy growth and lower LAI (Meireles et al., 2002). As the model presently contains no explicit nutrient cycles, we proxy these processes by adapting the LAI_{max} value to the fertilizer use level for two dominant CFTs: temperate cereals and maize. We use values provided for the year 2000 at the country level from IFA (2002) to scale the LAI_{max} within the range given in Table 1: for countries with very low (respectively high) fertilizer application, the model uses the lowest (respectively highest) LAI_{max}. For rice, such a proxy is not directly applicable, because more information is required to characterize each of the two cycles within a year.

Irrigation. Irrigated segments are prescribed from land use data (see 'Input data'). When irrigation occurs, absence of water stress is assumed during the growing season. Additional water is provided as soon as the water content of the upper soil layer is insufficient to maintain a ratio between plant canopy water supply and atmospheric demand for transpiration of 0.7. The water balance routine determines the daily amount of irrigated water required to meet this condition. Owing to the additional water supply, evapotranspiration, as well as CO₂ uptake increase. Irrigation water is currently not depending on local water supply and is subtracted from runoff on an annual basis.

Harvest and residue management. Harvest occurs as soon as maturity is reached. At harvest, the storage organs are removed and their carbon content is assumed to respire within the same year. The carbon of the roots is added to the belowground litter pool. Different options can be considered for the management of crop residues, which depends on the regional agricultural system. Straw may either be burnt (Yadvinder-Singh et al., 2004), grazed (Fernandez-Rivera et al., 1989), processed for animal feed or bedding (Lopez-Guisa et al., 1991; Powell et al., 2004), or ploughed into the soil (Caviness et al., 1986). This management may change due to new policies, (e.g. by encouraged removal of crop residues for the production of bioenergy in areas where previously they were more typically left on the fields; Sheehan et al., 2004; Wilhelm et al., 2004; Lal, 2005). Residues may also be incorporated into the soil in order to increase soil carbon sequestration or to reduce risks or emissions from fire (King et al., 2004).

As there are no reliable global data for residue management practices, we here only compare two extreme options, 'residues in' where the crop straw/ residues are left (and sent to the litter pool), and 'residues out' where they are removed almost entirely (90% of the aboveground biomass after yield harvest). In the latter case, the carbon content is respired to the atmosphere within the same year, without considering any carbon return from green manure or ash input. LPJmL does not simulate carbon emission due to different tillage practices.

Intercropping. In LPJmL, double-growing seasons within 1 year are at present allowed only for a monoculture system rice-rice. There is currently no representation of other multiple crops like the rice-wheat system widely found in South Asia (Fujisaka *et al.*, 1994), the wheatsoybean or maize-soybean practices in North America, or the use of nitrogen-fixing crops to enhance soil

fertility. Fallowing which is practiced for water conservation in some areas (e.g. the Great Plains in North America) is another form of management between crop cycles. After harvest of the main crop, LPJmL optionally allows extensive grass growth to simulate some form of intercropping growth. At the beginning of the new crop cycle, carbon from leaves and roots of this grass is added to the litter pool.

Managed grass/grazing. For the segment of the grid cell covered by 'managed grass', we prescribe a 'human' or 'livestock' disturbance. We do not distinguish between hay/ensilage production and grazing by animals (for simplicity, 'grazing' refers to both in the remainder of this paper). LAI development is driven by the daily carbon allocation to leaves, following the phenological scale. When LAI reaches a threshold, grazing occurs at high intensity, expressed as the removal of 50% of the aboveground biomass. This fraction, which contributes to animal metabolism, is modelled as a carbon flux to the atmosphere, except for a small part (5%, mostly faeces) that enters the litter pool. Livestock density is not yet considered.

Input data

Climate and atmospheric CO_2 . Monthly data for mean temperature, precipitation, number of wet days, sunshine hours, gridded at 0.5° (longitude/latitude) resolution for 1901–2000, are based on CRU05 (New *et al.*, 2000; Österle *et al.*, 2003). A weather generator is used to determine the daily distribution of monthly precipitation (Gerten *et al.*, 2004b). Soil texture data and atmospheric CO₂ concentrations are used as in Sitch *et al.* (2003).

Land use. For the period 1901–2000, we have constructed a land use data set containing the percentage cover of each CFT, rain-fed and irrigated, within each grid cell, on a yearly time step. We use the cropland data set of Ramankutty & Foley (1999), which provides the historical cropland fraction of 0.5° grid cells until 1992. In order to extend this series to 2000, we simply assume the cropland fraction to remain constant after 1992. Leff et al. (2004) provide the distribution of 18 crops for 1990. A grazing grid-cell fraction is determined after comparison of the initial cropland fraction and the class 'grass and fodder' of the HYDE data set (Klein Goldewijk & Battjes, 1997) for 1970. By assuming no temporal change within the relative distribution of the different crops, we derive the annual distribution of the 13 CFTs for the entire period.

We use data on areas equipped for irrigation in 1995 (Döll & Siebert, 1999) to determine the irrigated agricultural fraction of the 0.5° grid cells, assuming irrigation to be efficient everywhere. In reality, some crops may only be irrigated during short periods in case of water scarcity or restriction, and irrigation efficiency differs widely across countries. In the absence of better information, we use these data as an approximation. We assume that, in 1901, only rice was irrigated. Then, the irrigated area of each grid cell increases linearly to its 1995 value, following the linear trend for global irrigation provided by Evans (1997). Only the segments of the grid cell covered by crops or managed grass may be irrigated. In order to estimate, which CFTs are most likely to be irrigated, we have established a priority list (derived mostly from European agricultural practices, see Table 1) and apply it globally. This rough approximation allows implementing both rain-fed and irrigated crops in LPJmL.

Simulation experiments

Global and grid-cell level simulations were performed with LPJmL and LPJ (where appropriate) to test essential model features (Table 2). A 900-year spin-up using the first 30 years of the climate and land use data sets is used to put carbon pools and fluxes in equilibrium. The impact of agriculture on the global carbon cycle during the 20th century was assessed in separate global simulation runs (Table 3). To illustrate the impact of management practices on the carbon cycle, we consider a range of four cases (residues removed or not, and intercropping permitted or not) for LPJmL and compare them with the original LPJ simulation.

Results

Comparison of model performance against observations

Sowing dates of temperate cereals. Figure 5 compares sowing dates for temperate cereals simulated by LPJmL to country-based crop statistics (USDA, 1994). For countries allowing this comparison, the northsouth gradient of simulated sowing agrees well with observations. The simulated border between late summer types and early winter types occurs around 45° in the United States in agreement with the observations. In Western Europe, the simulated limit occurs further north than in North America because of a milder climate, as confirmed by the observations. However, LPJmL simulates summer cereals for Poland, where statistics report winter cereals. In most of Asia, simulations and observations agree well. For the winter types, the simulated sowing dates in the northern hemisphere show a large North-South range from October to December. This trend is confirmed in

© 2007 The Authors

Table 2 LPJmL simulations performed to test various model features

Boston Univ. fPAR (NOAA/

USDA crop calendar

[1990–1995] average [1982–2000] average [1991–2000] average

Annual sdate

1971-2000 no spin-up

No Yes

Yes ξes

Global LPJmL and

Global LPJml

(c) Yield estimation

(d) C fluxes

[L]

Local LPJml

Yes

Global LPJmL

(a) Sowing date (b) Phenology

Period analysed

Variable analysed

Period run

Land use change

CFT fraction

cover used

Global/local run

considered

FAO national statistics

AVHRR)

Eddy flux data

Individual years with eddy

1971–2001 no spin-up Monthly GPP, R_{eco}

Harvested yield Monthly fPAR

1971-2000 no spin-up 1901-2000 spin-up

°N °N

[1901-2000] trend

carbon, annual carbon respiration, harvested

fluxes (NPP, soil

carbon)

Soil and vegetation

1901-2000 spin-up

Yes

prescribed)

Yes

Local LPJml and

(e) Changes in carbon stocks/ fluxes due to agriculture and

land use change for specific

grid cells

LPJ

No (CFT

and NEE

flux data

Data used for comparison

Qualitative assessment from

literature

All simulations were made without intercropping, and with removal of residue. Intercropping affects fPAR (b), and all variables related to the carbon cycle (d) and (e). Residue LPJmL, Lund-Potsdam-Jena managed Land; fPAR, fraction of photosynthetically active radiation; CFT, crop functional type; NEE, net ecosystem exchange; GPP, gross primary management affects only the variables related to the carbon cycle (d) and (e). LPJ simulations are made in order to compare results for natural vegetation with those for actual production; state, sowing date; NPP, net primary production; $R_{
m eco}$, ecosystem respiration vegetation.

Europe by the data for several small countries located along that gradient, but cannot be tested in large countries such as the United States. In the southern hemisphere, simulated sowing dates (May) uniformly correspond to southern hemisphere winter types, as is also observed.

Satellite observations of monthly fPAR. The simulated seasonal fPAR of each grid cell is determined by the phenology of the different PFTs and CFTs that are present, and can be compared with satellite fPAR. Figure 6a shows the average seasonal fPAR for a large area in the Northern US and Canada Great Plains, a region characterized by rather homogenous climate and land use. Land use in these grid cells is at least 25% agricultural (cropland and grazing) and temperate cereals account for at least 25% of the agricultural fraction (37% on average). The satellite fPAR is compared with the modelled fPAR from, respectively, LPJ for natural vegetation, LPJ with natural grass growing in the agricultural areas (for comparison), and LPJmL. Natural vegetation in the region is simulated by LPJ as dominated by evergreen trees, therefore, its simulated fPAR is high during all months. When croplands are simulated as natural grasslands, the simulated fPAR reproduces the observed difference in the greenness activity of the canopy between summer and winter, but it represents higher activity in late summer than is observed. Simulated fPAR better approaches observations when crops are simulated by LPJmL: simulated fPAR is high only during a short period in July when the fields are covered by temperate cereals and rapeseed. Grassland, natural vegetation and some summer crops like maize explain why simulated fPAR remains around 0.4-0.5 until October. The satellite observations confirm the seasonal representation of fPAR at the regional level (including its mixture of natural vegetation, grassland and different crops) in LPJmL.

Figure 6b is an example of an agricultural system where simulated and observed seasonal fPAR agrees less well. In this area in semiarid Pakistan, only little grass grows naturally. Land use data indicate that the grid cell is nearly entirely cultivated (with 60% temperate cereals), and well irrigated. LPJmL simulates a single-crop cycle, in phase with the first fPAR cycle observed by the satellite. The satellite data show a second cycle, as important as the first one. This is probably explained by the double wheat-rice cropping, common in that area, but not modelled in LPJmL. Nevertheless, because of the irrigated crop cycle, LPJmL performs better than LPJ.

Generally, the phenology simulated by LPJmL agrees better with observations than the LPJ simulations not

© 2007 The Authors

Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd, Global Change Biology, 13, 679-706

Table 3	Global	simulations	for the	e period	1901-	-2000
---------	--------	-------------	---------	----------	-------	-------

20th century global runs	Land use data considered	Intercropping	Crop residue management	Period simulated	Period analysed
(a) LPJ	No	n/a	n/a	1901-2000 with spin-up	1901-2000 trend
(b) LPJmL	Yes	Yes	In	1901-2000 with spin-up	1901-2000 trend
(c) LPJmL	Yes	Yes	Out	1901-2000 with spin-up	1901-2000 trend
(d) LPJmL	Yes	No	In	1901-2000 with spin-up	1901-2000 trend
(e) LPJmL	Yes	No	Out	1901-2000 with spin-up	1901-2000 trend

LPJmL, Lund-Potsdam-Jena managed Land.



Fig. 5 Sowing dates for temperate cereals simulated with Lund–Potsdam–Jena managed Land (LPJmL); (a) and recorded by USDA (1994) statistics (b). Observed sowing dates are only shown for grid cells where land use data initiated LPJmL simulations for the respective crop. In countries with large climatic variation, only the central value of the reported range is shown (United States, Former Soviet Union, Mexico, Argentina, South Africa, Australia). Outside the areas of overlap Fig. 4b distinguishes winter and summer type sowing dates in the same country (United States, China, UK), otherwise only the dominant type is considered. Countries that are not reported by USDA are excluded.



Fig. 6 Satellite-derived and simulated fraction of absorbed photosynthetically active radiation (fPAR) for a large area in the Northern United States and Canada (a, 767 grid cells, $1.6 \times 10^6 \text{ km}^2$), and a dry area grid cell in Pakistan (b, 72°E, 30°N). Satellite data from the Boston University NOAA–AVHRR product Myneni *et al.* (1997), averaged over the period 1982–2000, interpolated to the 0.5° grid (sat.). Model simulations for Lund–Potsdam–Jena (LPJ) with natural vegetation, LPJ with natural grasslands occupying agricultural areas (LPJ-G), and with LPJ managed Land (LPJmL).



Fig. 7 Distances between monthly satellite observed fraction of photosynthetically active radiation (fPAR) and simulated fPAR (quadratic sum), for LPJ 'potential natural', LPJ 'grassland as cropland' (LPJ-G), and LPJ managed Land (LPJmL), normalized to that of LPJ 'potential natural'. Seven groups are considered [grid cells contain at least 25% agriculture, 25% of which is dominated by one crop functional type (CFT)], and the whole area with at least 25% agriculture. graz., grazing; temp.cs, temperate cereals; soyb., soybean; trop.cs, tropical cereals; gr.nuts, groundnuts; agric., agriculture. Area totals in 10⁶ km².

representing the agricultural seasonal cycles. We quantify this improvement by computing the sum of the 12 monthly squared distances between simulated and observed fPAR for CFT-specific dominated regions. Figure 7 shows the results for the seven CFTs where enough grid cells where available for the analysis, and for the total area of grid cells with at least 25% of agriculture coverage $(53 \times 10^6 \text{ km}^2)$, or a third of all land grid cells).

For all CFTs, simulated fPAR is closer to observed fPAR if LPJmL is used than otherwise. In most cases, using natural grassland as a surrogate for agriculture also improves the simulated fPAR of standard LPJ, but to a lesser degree. The performance of different CFTs varies, with the closest match observed for temperate cereals and the weakest for rice. This could be due to greater variability between the different rice varieties (and their respective crop calendar) grown in Asia, and mixtures with other crops. Modelling of the phenology for these subtropical agricultural systems needs to be improved. Overall, however, LPJmL clearly improves the simulated phenology of all pixels with at least 25% agricultural fraction.

Yield. FAO provides annual country yield statistics of major crops since 1961. In the long term, yield levels change mainly because of technological progress (plant breeding, fertilizer and pesticide use, etc.). We,

therefore, compare simulated and observed yields only for the period 1991–1995 and for two dominant CFTs worldwide; temperate cereals and maize. Rice is also important, but we have seen that the simulated phenology in rice areas is not well validated by the satellite fPAR. LPJmL needs to be improved before rice yields can be evaluated. Figures 8 and 10 show LPJmLsimulated yields for temperate cereals and maize (rainfed only, and with irrigation). Figures 9 and 11 compare national totals for 45 (respectively 41) countries against FAO statistics. A number of yield-impacting processes are represented only in simplified form (fertilizer input) or not at all in LPJmL (pests and weeds), therefore only a first-order qualitative comparison can be made.

Temperate cereals. As expected, the highest yields are found in Western Europe, China, Japan, and Korea, due to favourable climatic conditions and high fertilizer inputs. Irrigation plays a particular role in some areas (the Nile valley and delta, northern Pakistan, Israel and Lebanon, and in some areas in Northern and Southern Africa, South America and Australia, cf. Fig. 8b).

On a country basis, the highest yields are simulated and observed in western Atlantic Europe, as confirmed by the FAO (Fig. 9). The lowest yields are simulated for countries under dry climate with limited irrigation and low fertilizers inputs, also in agreement with observations (Caucasus, Central Asia, Australia). However, under the more favourable climate of some former USSR countries, LPJmL simulates higher yields than reported. Large discrepancies are obtained for two countries with prescribed large irrigation (Egypt and Mexico). The rain-fed/irrigated ratio may be wrong in our input data.

Maize. Maize is the second CFT on the irrigation priority list (after rice, assumed to never encounter water stress). The rain-fed simulation, therefore, strongly differs from the one including irrigation (Fig. 10a and b). The high yields in the Mediterranean regions and in drier regions in the United States, India, China, Australia, southern Africa and southern America, clearly rely on irrigation. In the tropics, maize is grown extensively, and resulting yields are mostly low,



Fig. 8 Simulated yields for temperate cereals, averaged 1991–2000, rain-fed (a) and rain-fed plus irrigated (b).

© 2007 The Authors



Fig. 9 Country-based comparison of simulated and observed yields for temperate cereals, based on FAO statistics. Internet country codes are used: ar, Argentina; at, Austrai; au, Australia; be, Belgium; br, Brazil; ca, Canada; cg, Congo; ch, Switzerland; cn, China; de, Germany; dk, Denmark; eg, Egypt; es, Spain; fi, Finland; fr, France; gr, Greece; id, Indonesia; ie, Ireland; in, India; it, Italy; lu, Luxemburg; ml, Mali; mx, Mexico; ng, Nigeria; nl, the Netherlands; no, Norway; ph, Philippines; pt, Portugal; ru, Russian Federation; se, Sweden; th, Thailand; tr, Turkey; uk, United Kingdom; us, United States; ve, Venezuela; za, South Africa.

except for some highland areas in Cameroon, Eastern Africa, Colombia and Venezuela, where the relatively cool climate allows a longer cycle. LPJmL simulates the highest yields for temperate areas under intensive management, including irrigation if necessary (Western Europe, Mediterranean, China, Korea, some areas in the United States).

LPJmL generally overestimates yields for tropical countries, and underestimates yields for rather cold countries (Fig. 11). Simulations agree generally well with observations in countries with warm temperate climate and irrigation, with Greece having the highest yields (above 8 tDM ha^{-1}). Outliers are probably partly explained by inadequate quantification of irrigation (e.g. Portugal, South Africa, Georgia, Azerbaijan).

*Seasonal CO*² *fluxes*. Data from CO² *flux* measurements over crops were available for three sites (Fig. 12): Ponca and Bondville from the Ameriflux network (http:// public.ornl.gov/ameriflux), and Jokioinen in Finland (Lohila *et al.*, 2004). Daily values for gross primary production (GPP) and ecosystem respiration (R_{eco} , sum of autotrophic and heterotrophic respiration) were provided from net ecosystem exchange data (NEE = R_{eco} -GPP) by the algorithm of Reichstein *et al.* (2005). As LPJmL is driven by monthly climatic data, we compare monthly simulated fluxes with monthly totals of observed fluxes. No local information regarding sowing date and cultivar was used for the simulations, because we assume that the sites are typical for their respective regions and LPJmL is designed to represent the typical crop of the area. The same CFT (temperate cereals) is used to simulate winter wheat in Ponca and spring barley in Jokioinen.

LPJmL successfully reproduces the observed seasonal cycle for GPP, distinguishing the winter type in Ponca (early growth, maturity in June) from the spring type in Jokioinen (growth in late spring, mature in late summer). For Bondville, the phase of the seasonal cycle is also reproduced, both for soybeans and for maize. This is a notable agreement, as sowing dates are modelled rather than prescribed. The same holds true to some extent for R_{eco} .

At Bondville, simulated R_{eco} is much higher than the observations for both maize years 1997 and 1999. The low-observed R_{eco} values are explained by the fact that maize is grown in a maize/soybean rotation. As soybean produces much less biomass than maize, there is also less litter and root biomass, and soil respiration in the year following soybean is low. As there is no crop rotation in this LPJmL simulation, the soil respiration simulated at Bondville in 1997 or 1999 is based on a long-term simulation that grows maize each year, and generates therefore constantly high soil respiration. Despite the discrepancies for R_{eco} , the agreement between simulated and observed seasonal





Fig. 12 Simulated and observed fluxes of carbon (in gCn^{-2} month⁻¹) for agricultural crops for three sites, Jokioinen (Finland, 23°31′E/ 60°54′N, 2001: spring barley), Ponca (Oklahoma, US, 97°08′W/36°46′N, 1997: winter wheat), and Bondville (IL, US, 88°17′W/40°00′N, 1997, 1999: maize, 1998: soybean). GPP, gross primary production, R_{eco} , ecosystem respiration (sum of autotrophic and heterotrophic respiration), and NEE, net ecosystem exchange.

NEE is rather good, although a good visual agreement (as for Bondville in 1997) can also be obtained when simulated GPP and R_{eco} are both too high (see rmse values on Fig. 12g–i).

Soil carbon content and carbon emission due to land use and land use change. We are unaware of any appropriate global data set for soil carbon content of agricultural soils. Different data sets refer to different soil depths. Past and present farming practices play an important role (tillage, residue management, crop rotation, etc.). We, therefore, do not attempt to test simulated soil carbon values under croplands or grazing land against literature data. Instead, we investigate the capability of LPJmL to reproduce the effect of land use and land use change on soil carbon content as reported in the literature (e.g. the meta analysis of Guo & Gifford, 2002). We evaluate model simulations for natural vegetation LPJ and LPJmL in seven selected grid cells with different climate, and different 20th century trends in agricultural land use (Fig. 13).

Generally, carbon pools (vegetation, soil) are considerably lower under cultivation, except for dry conditions, where the natural vegetation consists of grassland only (sites 4 and 5). NPP of croplands is similar to that of natural vegetation although is may be both higher (e.g. site 3) and lower (e.g. site 5). Interannual fluctuation of NPP, $R_{\rm h}$ and NBP are caused by climate variations.

For relatively stable land use, carbon pools and fluxes remain mostly constant, reacting only to changes in atmospheric [CO₂] and climate (e.g. sites 1 and 6).

With increasing agricultural land use, carbon pools decrease as natural forest is replaced by cropland (sites 2

© 2007 The Authors

Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd, Global Change Biology, 13, 679-706



Fig. 13 Twentieth century trends in agricultural land use (percent, top row), vegetation carbon content [kg C m⁻², second row, Lund–Potsdam–Jena (LPJ) and LPJ managed Land (LPJmL)], soil and litter carbon content (kg C m⁻², third row, LPJ and LPJmL) and LPJmL carbon fluxes (g C m⁻² yr⁻¹, bottom row, npp, net primary productivity; rh, heterotrophic respiration; har, harvest; and nbp, net biome productivity; i.e. the net carbon exchange or the sum of all fluxes), for seven selected grid cells representing different responses to land use change. Smaller order emissions from natural fires, or carbon sequestration through establishment or sowing are not shown. In the top row, the percents cover of crops and managed grassland at the end of the 20th century are given, and the biome characterization of the potential natural vegetation of the grid cell is indicated within brackets.

and 3). In natural grassland (site 4), vegetation carbon is unaffected by land use change but soil and litter carbon decline as additional carbon is removed by crop harvest. In semiarid regions (site 5), irrigation is responsible for the increased soil carbon. The increasing agricultural land use share results in increasing harvested carbon (f2-f5), and decreasing soil respiration following the decreases in soil carbon stocks.

In managed grasslands (site 6), soil carbon is higher than under natural vegetation (woody savanna), as parts of the vegetation carbon are regularly exported to the litter pool. This agrees with findings from Guo & Gifford (2002) on forest conversion to pasture in regions with this level of precipitation (annually \sim 350–400 mm).

In the case of agricultural abandonment (site 7), carbon pools slowly start to build up, causing R_h to increase. However, the rate of the secondary forest growth seems to be underestimated.

With deforestation or afforestation, the net carbon balance (or NBP) tends to be either a small source or a small sink, respectively. Overall, carbon fluxes and pools shown for these widely differing situations of land use and land use change correspond well to expectations and literature assessments, although many relevant processes are not represented in the model (e.g. top soil erosion).

Global simulations for the 20th century

The evaluation of LPJmL indicates that the model is robust enough to allow a mechanistic, process-based first-order assessment of the combined effects of land use change, climate change, atmospheric [CO₂] increase and changes in irrigation to be made at the global scale for the 20th century. The dominant factors influencing the magnitude of the agricultural perturbation of global biogeochemical cycles and climate are accounted for: (i) land use and land use changes (allocation of land to specific crops, deforestation, afforestation), (ii) influence of climate change and atmospheric [CO₂] increase on crop growth, (iii) irrigation increase. Significant management changes are not yet accounted for (plant

breeding, fertilizer and pesticides application, machinery), but the present model version can nevertheless be used to assess the impact of agriculture on carbon and water cycles. For the period 1901–2000, we have performed four global simulations at 0.5° resolution (with/ without residue removal, with/without intercropping, Table 3).

Where cropland replaces natural forests, vegetation and soil carbon pools are reduced substantially (Fig. 14a and b). In some areas, however, irrigation allows agricultural areas to accumulate more vegetation carbon than natural vegetation would have done (Pakistan, Northern India, Egypt). In rangelands, LPJmL may simulate higher soil carbon contents than LPJ if pastures dominate the agricultural land cover (Central Africa, Australia, Argentina, Fig. 14b), but the difference is very small. The increase of NPP (Fig. 14c) is generally associated with irrigation and/or high fertilizer use. In some places (Southeast United States, Argentina), climate favours crops and pastures as simulated by LPJmL in terms of their productivity rather than the natural PFTs. In other areas, agricultural NPP decreases.

Total cropland area has increased during the first half of the century (Fig. 15a), most rapidly during the 1950s when several cropland extension programs were initiated worldwide (e.g. Central Asia). It then slowed down and reached quasi-stable conditions in the 1980s. During that period, deforestation in the tropics is largely compensated by afforestation in the temperate zones in the Ramankutty & Foley (1999) data set. Total vegetation carbon (Fig. 15b) for natural vegetation increased during the simulation due to CO2 fertilization, while actual vegetation carbon (simulated by LPJmL) decreased when cropland areas increased most. However, when the cropland extension rate declined and the CO₂ effect became dominant, actual vegetation carbon content increased once more to reach approximately 520 Gt C in the 1980s.

Management impacts are most visible for soil carbon (Fig. 15c): depending on residue management and on intercropping, the overall reduction in total soil carbon due to agriculture varies between 8% and 13%. As a large amount of carbon belongs to a pool with long turnover time, temporal changes are small.

The amount of harvested products increases during the 20th century (Fig. 15d and e) as a consequence of increasing agricultural area and productivity (Fig. 15f). LPJmL simulates the global crop harvest to be \sim 2.2 Pg C yr⁻¹ in the 1990s, while grazing accounts for

 \sim 3.6 Pg C yr⁻¹. Residue management has a strong impact on harvested carbon (Fig. 15e): between 6 and 9 Pg C yr⁻¹ are appropriated by humans in the 1990s.

Using the same model of CO_2 and water exchange, simulated NPP of actual and natural vegetation responds similarly to CO_2 fertilization and climate change during the 20th century (Fig. 15f). In the 1900s, LPJmL simulated a global actual NPP 10% lower than the potential NPP. This difference decreases with increasing irrigation.

LPJ simulates a net sink of carbon in natural vegetation during the 20th century, especially in the second half (Fig. 15g). In contrast, LPJmL simulates the actual ecosystems to be a source until 1970, and then a small sink. This is due to emissions from land use change in the first half of the century, which are later compensated by CO₂ 'fertilization'. In the 1980s LPJmL simulates the terrestrial biosphere to be nearly carbon neutral (slight source) with values between 0.04 and 0.16 Pg C yr⁻¹, and in the 1990s a net sink occurs with values between -0.61 and -0.75 Pg C yr⁻¹.

The difference between the net carbon fluxes simulated by LPJ and by LPJmL corresponds to the carbon emission due to land use and land use change (Fig. 15h) and can be compared with estimates made by Houghton (2003). Until the 1970s, LPJmL simulations follow the curve of Houghton (2003) quite closely. After 1980, croplands no longer increase in our land use data set while they do in the analysis of Houghton. Following Ramankutty & Foley (1999), deforestation is either reduced or compensated by afforestation that sequesters carbon. In consequence, the net biospheric carbon source remains lower than the Houghton's estimate. If LPJmL is run with the IMAGE land use data (IMAGE team, 2001), which display significant ongoing deforestation at the end of the 20th century, then the resulting land use emissions are much higher (grey dashed line in Fig. 15h), and closer to Houghton's estimate.

Owing to the tight coupling of transpiration and carbon uptake, changes in carbon fluxes due to agriculture are immediately associated with changes in water fluxes as simulated in LPJmL. Because of shorter seasonal cycles, global transpiration and interception are reduced when agriculture is simulated (Fig. 16a and b), while there is more evaporation (Fig. 16c). Intercropping (extensive grass) has only a secondary effect. In contrast, the impact on runoff is minimal (Fig. 16d). Using LPJmL without irrigation, Gerten *et al.* (2004a) showed that

Fig. 14 Difference in vegetation carbon (a), soil carbon (b), and net primary productivity (c) due to agriculture, averaged for the period 1991–2000, between a simulation for present day vegetation [Lund–Potsdam–Jena managed Land (LPJmL)] and a 'potential natural vegetation' simulation (LPJ).





Fig. 15 Global agriculture-related carbon trends in the 20th century. The range of different Lund–Potsdam–Jena managed Land (LPJmL) results due to different management options (Table 3) is shown by filling the domain between the highest and the lowest individual LPJmL curves: (a) global cropland area (10^6 km^2) from Ramankutty & Foley (1999); (b) vegetation carbon content (Pg C, LPJ and LPJmL), O, Olson *et al.* (1985); W, WBGU (1998); S, Saugier *et al.* (2001); (c) soil and litter carbon content (Pg C, LPJ and LPJmL), P, Post *et al.* (1982); E, Eswaran *et al.* (1993); B, Batjes (1996); (d) crops and grazing harvest (Pg C yr⁻¹, LPJmL), Ec, Erb and Kraussmann, (personal communication) for crops; Eg, idem for grazing; (e) total harvested carbon (Pg C yr⁻¹, LPJmL), Wi, Wirsenius (2003); (f) net primary productivity (Pg C yr⁻¹, LPJ and LPJmL); (g) net ecosystem exchange (Pg C yr⁻¹, LPJ and LPJmL), the grey-shaded regions represent the uncertainty range of different estimates based on analyses of CO₂ and O₂ budgets in the 1980s and 1990s (see 'Discussion'); (h) net flux between land biosphere and atmosphere due to land use and land use change (Pg C yr⁻¹), estimated by Houghton (2003), LPJmL with land use change from IMAGE (IMAGE team, 2001), the grey-shaded regions represent the uncertainty range of different estimates provided by Schimel *et al.* (2001) for the 1980s and for the 1990s.

agriculture slightly increases runoff. This very small difference is visible at the beginning of our simulation, but as irrigation increases during the 20th century, more water is taken out from the rivers and transpired by plants. As a result, at the end of the 20th century actual runoff is no longer higher than natural runoff.



Fig. 16 Global agriculture-related water trends in the 20th century: (a) transpiration [10³ km³, Lund–Potsdam–Jena (LPJ) and LPJ managed Land (LPJmL)]; (b) interception (10³ km³, LPJ and LPJmL); (c) evaporation (10³ km³, LPJ and LPJmL); (d) runoff (10³ km³, LPJ and LPJmL).

Discussion

LPJmL is a functional representation of the world's terrestrial ecosystems combining natural vegetation, agricultural crops and grazing land. The model is capable of assessing the physical and biogeochemical responses of the land biosphere to changes in land use, climate and atmospheric CO_2 , including the yields of major crops under given conditions of agrotechnological development. In this section, we compare our global results with published estimates. We also address remaining shortcomings of the approach and we indicate steps towards further improvements.

NPP of agricultural areas

Using satellite data and a light use efficiency (LUE) model, DeFries *et al.* (1999) provide a map of changes in NPP due to land use for the late 1980s. These results are sensitive to the LUE parameterization, but it is informative to compare them with LPJmL. Agreement is good in many areas (Fig. 14c): agriculture increases NPP in intensively managed or irrigated areas (Europe, China, Pakistan, Argentina, southern United States), and de-

creases it elsewhere. But as temperate cereals and maize are indicated to be grown extensively in United States and Australia (IFA, 2002), we find reduced NPP both in the US Central Plains and in the Australian wheat belt. This is in contrast with both, regional studies demonstrating high intensity in these regions (e.g. Bradford *et al.*, 2005), resulting in an increase of agricultural NPP compared with natural NPP, and also with the satellitedriven LUE model (DeFries *et al.*, 1999). LPJmL cannot reproduce these features as long as no management data are available at the regional scale.

Global carbon pools

The simulated global biomass of the actual vegetation (520 Gt C in the 1980s) is on the same order as published estimates: 560 ± 100 Gt C (Olson *et al.*, 1985), 466 Gt C (WBGU, 1998), 652 Gt C (Saugier *et al.*, 2001). Global estimates of soil carbon remain uncertain and vary strongly in the literature. Values of 1395 and 1576 Gt C are provided by Post *et al.* (1982) and Eswaran *et al.* (1993) respectively, but Batjes (1996) gives approximately 2400 Gt C. The six DGVMs compared by Cramer *et al.* (2001) all simulate lower values, in the range 850–

1200 Gt C. Considering these uncertainties, we may only say that the LPJmL total soil carbon and its depletion due to land use change are plausible.

Harvested carbon

Compared against statistics derived from FAO data for the year 2000 (K.H. Erb & F. Kraussmann, personal communication) our global simulation of total crop and grazing harvest appears too high, especially for grazing (Fig. 15d). Wirsenius (2003) estimated the global appropriation of terrestrial phytomass production by the food system to be around $5.9 \, Pg \, C \, yr^{-1}$ for the early 1990s. This number includes removed by-products such as straw, while we get a similar value without residues (Fig. 15e lower curve). The main problem seems to be grazing which LPJmL simulates with rather high intensity everywhere. Results are expected to improve when livestock density, as well as the impact of soil degradation on NPP are accounted for (reduction in extensively used or overgrazed areas).

Carbon fluxes

Previous studies using LPJ show natural vegetation to be a net carbon sink in the second half of the 20th century (Cramer *et al.*, 2001; Sitch *et al.*, 2003; Schaphoff *et al.*, 2006). McGuire *et al.* (2001), using a very simple representation of the effects of land use change on the carbon cycle within LPJ, broadly showed a picture similar to LPJmL: a net source until 1970, then a small sink. LPJmL simulated values of $0.04-0.16 \text{ Pg C yr}^{-1}$ for the 1980s and $-0.61--0.75 \text{ Pg C yr}^{-1}$ for the 1990s that fit within the range of recent estimates (1980s/1990s): $-0.2 \pm 0.7/-1.4 \pm 0.7 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (Schimel *et al.*, 2001), $-0.3 \pm 0.9/-1.2 \pm 0.9 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (Bopp *et al.*, 2002) and $-0.4 \pm 0.7/-0.7 \pm 0.8 \text{ Pg C yr}^{-1}$ (Plattner *et al.*, 2002).

Emissions due to land-use change until 1970 are simulated by LPJmL to be in good agreement with Houghton (2003). Despite the fact that different land use data generate twofold changes in simulated emissions for the following decades, the LPJmL simulations remain within the range from other studies: 0.6-2.5 Pg C yr⁻¹ (1980s, Schimel et al., 2001) and 0.8- 2.4 Pg C yr^{-1} (1990s, Schimel *et al.*, 2001), and 1.4- 3 Pg C yr^{-1} (1990s, House *et al.*, 2003). The large uncertainty expressed by the estimates of recent deforestation rates and the size of the terrestrial carbon sink demonstrates the large degree of uncertainty present in current data and interpretation. Results from process-based models such as LPJmL do not necessarily reduce this uncertainty, but they offer insights into the potential causes of the biogeochemical fluxes and their future development.

Sowing date

Broadly, the simulated sowing dates, and the selection of summer and winter types in cereals compare well with observations, although the USDA country-level sowing dates for temperate cereals allow only a qualitative comparison (Fig. 4). Better tests require gridded observations rather than country data. Regional data from a combination of local statistics and expert knowledge are now being assembled for many countries (e.g. Kucera & Genovese, 2004), and satellite derived data may also become available (e.g. Liew *et al.*, 1998). To assess how simulated 20th century trends in sowing date simulation are realistic is also difficult, as farming practices, machine technology and cultivar availability all play major roles.

Crop yield

Based on fertilizer use, we scaled a cultivation intensity related parameter (LAI_{max}) between countries. This produced realistic LPJmL yield simulations for the present (Figs 8 and 10). However, we do not consider technological or management changes over time (except irrigation) and, therefore, overestimate simulated yields in earlier decades of the 20th century (not shown), for a number of reasons. Most crops had much lower harvests around 1900, as the development toward high-yielding cultivars occurred mainly since 1960. Industrial fertilizers were broadly applied only after 1950 and their use has increased dramatically since. To account for such changes, the IMAGE team (2001) considers an empirical dynamic management factor that adjusts the simulated potential yields since 1970. Regional studies using detailed information about cultivars and farming practices are expected to provide more process-related model improvements for later generalization. In such a study with ORCHIDEE-STICS, Gervois (2004) was able to reproduce the 20th century observed yield trend for wheat in France. Additional investigations are needed to represent such temporal changes at the global scale in LPJmL.

While the global rate of increase of crop yields appears to be declining (Wollenweber *et al.*, 2005), predictions of future trends in farming practices, plant breeding, development of genetically modified organisms, are all uncertain. Overall, global fertilizer use will increase substantially, but its rate and geographic distribution may change due to environmental concerns, differences in socioeconomic conditions, and technological as well as political factors. Analysing several economic scenarios in Europe for the 21st century, Ewert *et al.* (2005) illustrated the importance of technology development for crop productivity. LPJmL is struc-

turally equipped to test hypotheses for the impact of such developments in the future, as long as the relevant information to parameterize these adequately is available.

Seasonal carbon fluxes

Monthly CO_2 fluxes simulated by LPJmL for specific crops compared well with observations from three sites (Fig. 11). For a more quantitative comparison against measured fluxes, LPJmL will have to be constrained with local information on the farming practices, as well as a better soil type characterization, and then run with daily meteorological data from the site. Additional tests are planned for a greater number of crop sites now becoming available, (e.g. from CarboEurope-IP; http:// www.carboeurope.org).

Land use data

The reconstruction of the distribution of rain-fed and irrigated CFTs during the 20th century suffers from several shortcomings. Inevitably, different published data sets have some inconsistencies, (e.g. some grid cells which were reported as being more than 70% equipped for irrigation in the 1990s; Döll & Siebert, 1999) had no cropland areas according to Ramankutty & Foley (1999). A number of such data problems are being addressed now (e.g. Ramankutty, 2004). Another problem is due to our assumption that the relative crop distribution within a grid cell remains constant during the 20th century. In reality, socioeconomic and political factors determining land allocation have changed in many areas. Soybean, for example, was still marginal in Argentina in the early 1960s and it is now grown on a larger area than wheat (FAOSTAT, 2004). The differentiation between wheat and soybean croplands may have little relevance for the first order estimation of GHG emissions due land use change, but it becomes important when their respective growing seasons and managements impact differently on biogeochemical fluxes, soil carbon and on climate. When crop production is simulated for food/feed or bioenergy assessments then this differentiation becomes imperative.

Some particular problems occur: for maize, the map of Leff *et al.* (2004) does not distinguish grain maize from fodder maize. Currently, the maize CFT in LPJmL corresponds to grain maize, which achieves rather low yields in northern areas (Fig. 9). Since in much of this area in reality fodder maize is grown (and as good spatial data for its distribution is missing), this underestimation of yield is difficult to overcome. In the absence of reliable data, we also assume that only rice was irrigated in 1900, but this is clearly not the case for countries like Egypt where irrigation has occurred for several millennia, and was already expanded during the 19th century.

Better data are required for grassland, as we were not aware of a published global data set providing the cover fraction of managed grassland. Further, carbon dynamics under cutting or grazing management differ (Orr *et al.*, 1988). Many studies also showed that grazing intensity impacts soil carbon (e.g. Frank *et al.*, 1995). Therefore, the implementation of a better parameterization for cutting/grazing within LPJmL will require the use of available data sets on grassland managements, like maps on livestock distribution (Kruska *et al.*, 2003).

CFT diversity

The current list of CFTs in LPJmL represents an attempt to cover the world's major crops, but it could be expanded or reduced for different purposes. Simulating all CFTs indicated by the present land use data set is computationally expensive. Global comparisons (not shown here) show that comparable results can be achieved for global stocks and fluxes when only the three most important CFTs in each grid cell are considered. A trade-off exists between the availability of historical information about the distribution of crops and the need to differentiate between them. For example, sunflower, soybean, groundnuts and rapeseed all belong to 'oil crops' in the HYDE land use database (Klein Goldewijk & Battjes, 1997), but their biogeochemical functions differ substantially (e.g. the groundnuts cycle depends on precipitation, while winter rapeseed has vernalization requirements). We, therefore, assign different CFTs to them. For assessments of food production, additional diversity is required, [e.g. to distinguish between potatoes and sugar beets (currently both in 'temperate roots')].

Water use

It is possible to use LPJmL for estimation of spatial and temporal changes in crop water use in response to changing CO_2 and climate. This is important as the predicted increasing demand in land for food, feed and bioenergy is expected to face water scarcity problems (Postel, 1998). A river routine module is currently implemented in a future model version, and this will limit the amount of water available for irrigation. For water supply from other sources (fossil groundwater resources or reservoirs) no appropriate data could be identified.

GHG fluxes, soil fertility

The current version of LPJmL simulates only CO2 fluxes - other GHG fluxes will be implemented into the same structure, beginning with emissions of methane from rice paddies and grazing animals, and N2O emissions. This is required for the assessment of various policies (limitation of fertilizer use, temporary drainage of flooded rice fields for methane emission mitigation, e.g. Li et al., 2005), and is linked to the representation of nutrient limitation in LPJmL. Soil organic matter, soil fertility and carbon emission are also related to the processing of residues, like tillage (Holland & Coleman, 1987), or straw burning, either in the fields or used as biofuel (Yevich & Logan, 2003). In order to test the impact of different management practices (related to specific agricultural systems or environmental policies) on soil conservation and GHG emissions, better management data are required at the global scale (Heistermann et al., 2006), but work is underway to improve the situation (e.g. Bouwman et al., 2005).

Future land use

The present study uses input data that prescribe historical land use, but for scenario calculations land use should be a dynamic variable. Land allocation is determined by potential crop productivity, and by socioeconomic and political factors including commodity markets, technology and capital. As a first step, LPJmL can replace crop suitability concepts such as the Agro Ecological Zones (AEZ) model (Fischer et al., 2002) to determine shifts in the most appropriate areas for the cultivation of major crops due to changes in climate. It is also possible to consider the yield level simulated by LPJmL in an economic land use model that estimates the land use shares at the grid-cell level and returns this information to LPJmL for a consistent assessment of the biogeochemical cycles. The results from a prototype version of such a land use model are shown for Germany by Lotze-Campen et al. (2005).

Conclusion

The LPJmL modelling strategy is simple enough to allow for global assessments of agricultural impacts on the terrestrial biogeochemical cycles, across multiple decades, and for the majority of crop types worldwide. Using an earlier LPJ version and a crude representation of croplands, McGuire *et al.* (2001), already showed the significance of land use for the terrestrial carbon cycle. By implementing a process-based representation of crops growth and harvesting fully consistent with LPJ, we account for most of the interactions between CO₂, climate, and land use to represent spatial and temporal dynamics of important biophysical and biogeochemical parameters, including the simulation of crop productivity. Unlike very detailed crop models requiring many input parameters, LPJmL simulates significant parameters of the crop phenology directly on the basis of the local climate, making the model widely applicable.

The benchmarking exercises have demonstrated the validity of the concept. We could quantify the role of land use on water and carbon cycles during the 20th century, including a global estimation of carbon harvested for food. LPJmL can, therefore, be used to test the impact of different management or land use scenarios on the biogeochemical cycles as related to food/feed production (Müller *et al.*, 2006). Even if predictions of technology changes are very uncertain, it is expected that LPJmL performs credibly under conditions that do not exist today, such as under higher atmospheric [CO₂], to assess the future role of land use within the climate-vegetation system (Zaehle *et al.*, in press; Schröter *et al.*, 2005; Müller *et al.*, manuscript).

Acknowledgements

We thank Franz-W. Badeck and Valentina Krysanova for useful discussions on crop modelling, Ranga Myneni for providing the Boston University fPAR, Birgit Schröder for the processing of the fPAR data. Pascalle Smith was supported by the French embassy in Berlin. Christoph Müller was supported by the International Max Planck Research School on Earth System Modelling (IMPRS-ESM). Markus Reichstein acknowledges support by a European Marie Curie Fellowship (MEIF-CT-2003-500696). This work was supported by the European Commission (ALARM GOCE-CT-2003-506675, ATEAM EVK2-CT-2000-00075, AVEC EVK2-CT-2001-00125, ENSEMBLES GOCE-CT-2003-505539, MATISSE GOCE-CT-2005-004059), the German Federal Ministry of Education and Science (DEKLIM/CVECA) and the Brandenburg Ministry for Science and Culture (AZ: 24-04/323; 200) – all of these sources are gratefully acknowledged.

References

- Alcamo J, Van Vuuren D, Ringler C et al. (2005) Changes in nature's balance sheet: model-based estimates of future worldwide ecosystem services. Ecology and Society, 10, 19 [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss2/art19/
- Arnold JG, Williams JR, Srinivasan R et al. (1994) SWAT, soil and water assessment tool. Report, USDA, Agriculture Research Service, Grassland, Soil & Water Research Laboratory, Temple, TX, US.
- Avissar R, Werth D (2005) Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation. *Journal of Hydrometeorology*, 6, 134–145.
- Batjes NH (1996) Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, **47**, 151–163.

© 2007 The Authors

Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd, Global Change Biology, 13, 679-706

- Betts RA (2001) Biogeophysical impacts of land use on presentday climate: near-surface temperature and radiative forcing. *Atmospheric Science Letters*, **2**, 39–51.
- Bonan GB (1999) Frost followed the plow: impacts of deforestation on the climate of the United States. *Ecological Applications*, 9, 1305–1315.
- Bopp L, Le Quéré C, Heimann M et al. (2002) Climate-induced oceanic oxygen fluxes: implications for the contemporary carbon budget. Global Biogeochemical Cycles, 16, 1022, doi: 10.1029/2001GB001445.
- Boswell VG (1926) The influence of temperature upon the growth and yield of garden peas. Proceedings of the American Society for Horticultural Sciences, 23, 162–168.
- Boucher O, Myhre G, Myhre A (2004) Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics*, 22, 597–603.
- Bouwman AF, Van Der Hoek KW, Eickhout B et al. (2005) Exploring changes in world ruminant production systems. *Agricultural Systems*, 84, 121–153.
- Bradford JB, Lauenroth WK, Burke IC (2005) The impact of cropping on primary production in the U.S. Great Plains. *Ecology*, 86, 1863–1872.
- Brisson N, Gary C, Justes E et al. (2003) An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy, 18, 309–332.
- Brovkin V, Claussen M, Driesschaert E (2006) Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics*, 26, 587–600.
- Brovkin V, Sitch S, von Bloh W et al. (2004) Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years. Global Change Biology, 10, 1–14.
- Caviness CE, Collins FC, Sullivan M (1986) Effect of wheat residue on early growth of soybean. Arkansas Farm Research, 35, 8.
- Challinor AJ, Slingo JM, Wheeler TR *et al.* (2004) Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**, 99–120.
- Challinor AJ, Wheeler TR, Osborne TM *et al.* (2006) Assessing the vulnerability of crop productivity to climate change thresholds using an integrated crop-climate model. In: *Avoiding Dangerous Climate Change* (eds Schellnhuber H-J, Cramer W, Nakicenovic N, Wigley T, Yohe G), pp. 187–194. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Cramer W, Bondeau A, Schaphoff S *et al.* (2004) Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series B*, **359**, 331–343.
- Cramer W, Bondeau A, Woodward FI *et al.* (2001) Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, **7**, 357–373.
- DeFries RS, Field CB, Fung I et al. (1999) Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. Global Biogeochemical Cycles, 13, 803–815.
- de Noblet-Ducoudré N, Claussen M, Prentice IC (2000) Mid-Holocene greening of the Sahara: comparing the response of

two coupled atmosphere/biome models. *Climate Dynamics*, **16**, 643–659.

- de Noblet-Ducoudré N, Gervois S, Ciais P *et al.* (2004) Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*, 24, 1–11.
- Döll P, Siebert S (1999) A Digital Global Map Of Irrigated Areas Documentation. University of Kassel, Kassel.
- Donner SD, Kucharik CJ (2003) Evaluating the impacts of land management and climate variability on crop production and nitrate export across the Upper Mississippi Basin. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**, 1085, doi: 10.1029/2001GB001808.
- Eswaran H, Van den Berg E, Reich P (1993) Organic carbon in soils of the World. Soil Science Society of America Journal, 57, 192–194.
- Evans LT (1997) Adapting and improving crops: the endless task. Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series B, **352**, 901–906.
- Ewert F, Metzger MJ, Rounsevell MDA et al. (2005) Future scenarios of European agricultural land use. I: estimating changes in crop productivity. Agriculture, Ecosystems and Environment, 107, 101–116.
- FAO (1978) Report on the Agro-Ecological-Zones Project, Vol. 1: Methodology and Results for Africa. FAO, Rome.
- FAOSTAT data (2004), http://faostat.fao.org/ [Accessed: May, 2004].
- Farquhar GD, von Caemmerer S, Berry JA (1980) A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, **149**, 78–90.
- Feddema JJ, Oleson KW, Bonan GB et al. (2005) A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncertainty in present-day land cover representations. Climate Dynamics, 25, 581–609.
- Fernandez-Rivera S, Lewis M, Klopfenstein TJ et al. (1989) A simulation model of forage yield, quality and intake and growth of growing cattle grazing cornstalks. *Journal of Animal Science*, 67, 581–589.
- Fischer G, Shah M, van Velthuizen H et al. (2002) Global Agro-Ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and results. IIASA Research Report RR-02-02, Laxenburg, Austria.
- Foley JA, DeFries RS, Asner GP et al. (2005) Global consequences of land use. *Science*, **309**, 570–574.
- Foley JA, Prentice IC, Ramankutty N et al. (1996) An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 603–628.
- Frank AB, Tanaka DL, Hofmann L et al. (1995) Soil carbon and nitrogen of Northern Great Plains grasslands as influenced by long-term grazing. *Journal of Range Management*, 48, 470–474.
- Fujisaka S, Harrington L, Hobbs P (1994) Rice-wheat in South Asia: systems and long-term priorities established through diagnostic research. *Agricultural Systems*, 46, 169–187.
- Gerten D, Bondeau A, Hoff H et al. (2004a) Assessment of 'green' water fluxes with a dynamic global vegetation model. In:

© 2007 The Authors

Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd, Global Change Biology, 13, 679-706

Hydrology: Science & Practice for the 21st Century (eds Webb B, Arnell N, Onofet C), British Hydrological Society, 1, 29–35.

- Gerten D, Schaphoff S, Haberlandt U *et al.* (2004b) Terrestrial vegetation and water balance hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, **286**, 249–270.
- Gervois S (2004) 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. Ph.D. Thesis, University Paris VI. 209 pp (in French).
- Gervois S, de Noblet-Ducoudré N, Viovy N et al. (2004) Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interactions*, **8**, 1–25.
- Gordon LJ, Steffen W, Jönsson BF et al. (2005) Human modification of global water vapor flows from the land surface. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, **102**, 7612–7617.
- Guo LB, Gifford RM (2002) Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology, 8, 345–360.
- Harrison PA, Downing TE, Porter JR (2000) Scaling-up the AFRCWHEAT2 model to assess phenological development for wheat in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, **101**, 167–186.
- Haxeltine A, Prentice IC (1996) BIOME3: an equilibrium terrestrial model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**, 693–709.
- Heistermann M, Müller C, Ronneberger K (2006) Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **114**, 141–158.
- Holland EA, Coleman DC (1987) Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem. *Ecology*, 68, 425–433.
- Houghton RA (2003) Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus Series B, Chemical and Physical Meteorology*, **55**, 378–390.
- House JI, Prentice IC, Ramankutty N *et al.* (2003) Reconciling apparent inconsistencies in estimates of terrestrial CO₂ sources and sinks. *Tellus Series B, Chemical and Physical Meteorology*, **55**, 345–363.
- IFA (2002) Fertilizer Use by Crop, 5th edn; http://www.fertilizer. org/ifa/statistics.asp. Rome, International Fertilizer Industry Association.
- IMAGE team (2001) The IMAGE 2.2 Implementation of the SRES Scenarios: A Comprehensive Analysis of Emissions, Climate Change and Impacts in the 21st century. National Institute for Public Health and the Environment, RIVM, Bilthoven, the Netherlands, CD-ROM publication 481508018.
- King JA, Harrison R, Carter AD et al. (2004) Carbon sequestration and saving potential associated with changes to the management of agricultural soils in England. Soil Use and Management, 20, 394–402.
- Klein Goldewijk K, Battjes JJ (1997) A hundred Year (1890–1990) Database for Integrated Environmental Assessments (HYDE, version 1.1). National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, the Netherlands.

- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N et al. (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**, GB1015, doi: 10.1029/2003GB002199.
- Kruska RL, Reid RS, Thornton PK et al. (2003) Mapping livestock-oriented agricultural production systems for the developing world. Agricultural Systems, 77, 39–63.
- Krysanova V, Hattermann F, Wechsung F (2005) Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Processes*, **19**, 763–783.
- Krysanova V, Wechsung F, Arnold J et al. (2000) SWIM (soil and water integrated model). User manual. PIK Report 69, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Germany.
- Kucera L, Genovese G (2004) Crop monographies on central European countries – MOCA Study, Joint Research Centre, Ispra, Italy. http://agrifish.jrc.it/marsstat/Crop_Yield_Forecasting/MOCA/
- Kucharik CJ (2003) Evaluation of a process-based agro-ecosystem model (Agro-IBIS) across the US corn belt: simulations of the interannual variability in maize yield. *Earth Interactions*, 7, 1–33.
- Kucharik CJ, Brye KR (2003) Integrated biosphere simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. *Journal of Environmental Quality*, **32**, 247–268.
- Lal R (2005) World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International*, **31**, 575–584.
- Leahy P, Kiely G, Scanlon TM (2004) Managed grasslands: a greenhouse gas sink or source? *Geophysical Research Letters*, 31, 20.
- Leff B, Ramankutty N, Foley JA (2004) Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB1009, doi: 10.1029/2003GB002108.
- Levy PE, Friend AD, White A *et al.* (2004) The influence of land use change on global-scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems. *Climatic Change*, **67**, 185–209.
- Li C, Frolking S, Xiao X et al. (2005) Modelling impacts of farming management alternatives on CO₂, CH₄ and N₂O emissions: a case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**, GB3010, doi: 10.1029/ 2004GB002341.
- Liew SC, Kam SP, Tuong TP et al. (1998) Application of multitemporal ERS-2 synthetic aperture radar in delineating rice cropping systems in the Mekong River Delta, Vietnam. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, 1412–1420.
- Lohila A, Aurela M, Tuovinen J-P et al. (2004) Annual CO₂ exchange of a peat field growing spring barley or perennial forage grass. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, **109**, D18116, doi: 10.1029/2004JD004715.
- Lopez-Guisa JM, Satter LD, Panciera M (1991) Utilization of ensiled corn crop residues by Holstein heifers. *Journal of Dairy Science*, 74, 3160–3166.
- Lotze-Campen H, Müller C, Bondeau A et al. (2005) How tight are the limits to land and water use? – Combined impacts of food demand and climate change. Advances in Geosciences, 4, 23–28.

- Lucht W, Prentice IC, Myneni RB *et al.* (2002) Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, **296**, 1687–1689.
- McGuire A, Sitch S, Clein J et al. (2001) Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analyses of CO₂, climate and land use effects with four processbased ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, **15**, 183–206.
- Meireles EJL, Pereira AR, Sentelhas PC et al. (2002) Calibration and test of the cropgro-dry bean model for edaphoclimatic conditions in the savanas of central Brazil. Scienta Agricola, 59, 723–729.
- Monsi M, Saeki T (1953) Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, **14**, 22–52.
- Monteith JL (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, **9**, 747–766.
- Müller C, Bondeau A, Lotze-Campen H et al. (2006) Comparative impact of climatic and non-climatic factors on global terrestrial carbon and water cycles. *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB4015, doi: 10.1029/2006GB002742.
- Müller C, Eickhout B, Zaehle S *et al.* (manuscript). Effects of changes in CO₂, climate and land-use on the carbon balance of the land biosphere during the 21st century.
- Myneni RB, Nemani RR, Running SW (1997) Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 1380–1393.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR et al. (2002) Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation + User's Manual. USDA-ARS-SR Grassland, Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service, Temple, TX, US.
- New M, Hulme M, Jones P (2000) Representing twentieth century space-time climate variability. II: development of 1901–1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal* of Climate, 13, 2217–2238.
- Österle H, Gerstengarbe FW, Werner PC (2003) Homogenisierung und Aktualisierung des Klimadatensatzes des Climate Research Unit der Universität of East Anglia, Norwich. Terra Nostra, 6. Deutsche Klimatagung 2003, Potsdam, Germany (in German).
- Ogle SM, Paustian K, Breidt FJ (2005) Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, **72**, 87–121.
- Olson J, Watts JA, Allison LJ (1985) Major World Ecosystem Complexes Ranked by Carbon in Live Vegetation: A Database. Carbon Dioxide Information Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Orr RJ, Parsons AJ, Treacher TT *et al.* (1988) Seasonal patterns of grass production under cutting or continuous stocking managements. *Grass and Forage Science*, **43**, 199–207.
- Parton WJ, Hartman MD, Ojima DS et al. (1998) DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. Global and Planetary Change, 19, 35–48.
- Peylin P, Bousquet P, Le Quéré C et al. (2005) Multiple constraints on regional CO₂ flux variations over land and oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**, GB1011, doi: 10.1029/2003GB002214.

- Plattner G-K, Joos F, Stocker TF (2002) Revision of the global carbon budget due to changing air-sea oxygen fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 1096, doi: 10.1029/2001GB001746.
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ (1982) Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, **298**, 156–159.
- Postel SL (1998) Water for food production: will there be enough in 2025? *BioScience*, **48**, 629–637.
- Powell JM, Pearson RA, Hiernaux PH (2004) Crop-livestock interactions in the West African drylands. *Agronomy Journal*, 96, 469–483.
- Prentice IC, Bondeau A, Cramer W et al. (2006) Dynamic global vegetation modelling: quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change. In: *Terrestrial Ecosystems in a Changing World* (eds Canadell JG, Pataki D, Pitelka LF), pp. 175–192. Springer-Verlag, Berlin.
- Prentice IC, Heimann M, Sitch S (2000) The carbon balance of the terrestrial biosphere: ecosystem models and atmospheric observations. *Ecological Applications*, 10, 1553–1573.
- Ramankutty N (2004) Croplands in West Africa: a geographically explicit dataset for use in models. *Earth Interactions*, 8, 1–22.
- Ramankutty N, Foley JA (1999) Estimating historical changes in global land cover; croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 997–1028.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D *et al.* (2005) On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, **11**, 1424–1439.
- Saugier B, Roy J, Mooney HA (2001) Estimations of global terrestrial productivity: converging toward a single number? In: *Terrestrial Global Productivity* (eds Roy J, Saugier B, Mooney HA), pp. 543–557. Academic Press, San Diego.
- Schaphoff S, Lucht W, Gerten D *et al.* (2006) Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections. *Climatic Change*, **74**, 97–122.
- Schimel DS, House JI, Hibbard KA *et al.* (2001) Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, **414**, 169–172.
- Schröter D, Cramer W, Leemans R et al. (2005) Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. Science, 310, 1333–1337.
- Sheehan J, Aden A, Paustian K et al. (2004) Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, 7, 117–146.
- Sitch S, Smith B, Prentice IC *et al.* (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, **9**, 161–185.
- Stehfest E, Heistermann M, Priess JA *et al.* (manuscript in preparation) Simulation of global crop production with the Ecosystem model DayCent.
- Stockle CO, Williams JR, Rosenberg NJ *et al.* (1992) A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: part 1 – Modification of the EPIC model for climatic change analysis. *Agricultural Systems*, **38**, 225–238.
- Tan G, Shibasaki R (2003) Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling*, **168**, 357–370.

© 2007 The Authors

Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd, Global Change Biology, 13, 679-706

- USDA (1994) Major world crop areas and climatic profiles. Agricultural Handbook 664, US Department of Agriculture (USDA), World Agricultural Outlook Board, Joint Agricultural Weather Facility Washington, DC.
- Wagner W, Scipal K, Pathe C et al. (2003) Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. *Journal of Geophy*sical Research, 108, 4611, doi: 10.1029/2003JD003663.
- WBGU (1998) The accounting of biological sinks and sources under the kyoto protocol – a step forwards or backwards for global environmental protection? WBGU Special Report, Bremerhaven, Germany, 75 pp.
- Weir AH, Bragg PL, Porter JR et al. (1984) A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *Journal of Agricultural Science*, **102**, 371–382.
- Wilhelm WW, Johnson JMF, Voorhees WB *et al.* (2004) Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agronomy Journal*, **96**, 1–17.
- Williams JR, Jones CA, Kiniry JR et al. (1989) The EPIC crop growth model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 32, 497–511.
- Wirsenius S (2003) The biomass metabolism of the food system, a model-based survey of the global and regional turnover of food biomass. *Journal of Industrial Ecology*, **7**, 47–80.

- Wollenweber B, Lübberstedt T, Porter JR (2005) Need for multidisciplinary research towards a second green revolution. *Current Opinion in Plant Biology*, 8, 337–341.
- Xue Y (1996) The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate. *Journal* of Climate, 9, 2173–2189.
- Yadvinder-Singh B-S, Ladha JK, Khind CS et al. (2004) Effects of residue decomposition on productivity and soil fertility in rice–wheat rotation. Soil Science Society of America Journal, 68, 854–864.
- Yevich R, Logan JA (2003) An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 6–1.
- Zaehle S (2005) Process-based simulation of the European terrestrial biosphere – An evaluation of present-day and future terrestrial carbon balance estimates and their uncertainty. PhD thesis. Universität Potsdam. Potsdam, Germany.
- Zaehle S, Bondeau A, Cramer W *et al.* (in press) Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990–2100.
- Zaehle S, Sitch S, Smith B et al. (2005) Effects of parameter uncertainties on the modeling of terrestrial biosphere dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 19, GB3020, doi: 10.1029/2004GB002395.
Annexe C

Participation au module LCC (Land Cover Change) d'ORCHIDEE

En collaboration avec Pierre Friedlingstein et Nicolas Viovy, j'ai pérennisé et complété le travail d'une stagiaire sur le traitement du devenir du carbone suite à une déforestation dans ORCHIDEE. Le nouveau module permet la conservation du carbone lors de simulations transitoires. Le devenir du carbone est traité pour chaque cas de conversion d'un type d'occupation du sol à un autre (déforestation, retournement de prairie, abandon de cultures...). Pour la déforestation, il se base sur le protocole adopté dans le cadre du CCMLP (Carbon Cycle Model Linkage Project). Ce module ne m'a pas servi pour cause d'incompatibilité temporaire entre la version d'ORCHIDEE couplée à STICS et celle comprenant le module LCC. Shilong Piao a fait des simulations globales avec (et testé) la version incluant le module LCC mais les flux de carbone n'ont pas fait l'objet de son analyse. Une fois les deux versions fusionnées, il sera possible d'étudier non seulement l'effet du fonctionnement des cultures sur le bilan de carbone mais aussi l'effet de leur extension ou abandon.

Annexe D

Contribution au rapport de projet APR GICC2 2003

"Adaptation des systèmes européens de production agricole au changement climatique : premiers essais d'évaluation"

Dans le cadre du projet GICC avec les économistes de l'INRA de Grignon (Elodie Debove et Pierre-Alain Jayet) j'ai réalisé des simulations sur la Picardie et sur la France pour tester l'effet de scénarios de changements d'affectation des surfaces agricoles sur les bilans d'eau et de carbone. On entend par surfaces agricoles ici les espèces qui peuvent être classées dans les 3 PFT agricoles et 2 PFT naturels herbacés d'ORCHIDEE-STICS. Il a fallu pour cela créer une interface pour faire communiquer les deux modèles AROPAj et ORCHIDEE-STICS. Une correspondance a dû être établie entre les régions Nuts2 et les mailles de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, ainsi qu'entre les catégories de cultures d'AROPAj et les PFT. Paul Zakharov a automatisé la génération, à partir des sorties d'AROPAj, de la carte de végétation nécessaire à ORCHIDEE-STICS. Ce travail s'est inspiré des correspondances établies dans le cadre de l'évaluation des rendements simulés sur une grille vis-à-vis de données de rendement par pays ou par région (chapitre 3). La méthode développée et les premiers résultats sont présentés dans le rapport qui suit (p260-263).



UMR Economie Publique INRA-INAPG UMR INRA 210) BP1, 78850 Grignon France



Institut national agronomique Paris-Grignon



A. Rappel des objectifs du projet

Fitre du projet

Adaptation des systèmes européens de production agricole au changement climatique : premiers essais d'évaluation et d'impacts sur les bilans d'eau et de carbone

Mots-clés : modèle économique, modèle climatique, modèle biophysique, adaptation, scénarios économiques et climatiques, échelle européenne, base de données, politique agricole, bilans d'eau et de carbone.

Thèmes de l'APR concernés : II.B.3

Responsable scientifique

Pierre-Alain Jayet, Directeur de Recherche INRA

UMR Economie Publique INRA INA P-G, BP01, Centre INRA de Versailles Grignon, 78850 Thiverval Grignon Tel :01 30 81 53 49; fax : 01 30 81 53 68; email : <u>jayet@grignon.inra.fr</u>





A.1. Résumé du projet



2

Le présent projet s'inscrit dans la continuité du projet financé dans le cadre de l'APR GICC 2002 et dans une perspective de modélisation intégrée de l'adaptation des systèmes de production agricole au dengement l'inatique. Il constant dans la dan endection agricole au dengement l'inatique. Il

I adaptation des systemes de production agrecole au changement cinnauque. In s'insère dans le thème clé du présent APR « II.B. » portant sur les stratégies d'adaptation à l'échelle régionale. Il rencontre également d'autres thèmes portant sur la modélisation climatique et la modélisation des événements extrêmes. Le précédent projet, financé par le programme GICC du MEDD, nous a

Le précédent projet, financé par le programme GICC du MEDD, nous a donné les moyens de développer le couplage entre le modèle économique AROPAJ et le modèle agronomique STICS, scientifiquement validé, adaptable aux différents systèmes types d'exploitation agricole présents dans l'Union Européenne ou anneús à être présents si le climat change. Cette étape, achevée courant 2005, a permis la mise en relation que vise le présent projet, à savoir l'intégration de scénarios climatiques au modèle économique. Ce projet s'appuie sur la collaboration entre une équipe de recherche de l'UMR Economie publique de l'INRA et une équipe de l'UMR LSCE du CEA/CNRS. Cette collaboration permettra d'avoir accès à des scénarios de changement climatique et d'en réliser d'autres dans le cadre de ce projet, si nécessaire. Une fois les scénarios climatiques pris en compte, on cherchera les possibilités d'adaptation du système de production agricole européen, allant des modifications des pratiques culturales (et donc l'introduction de nouvelles cultures adaptés au climat modifié) jusqu'à la cessation de l'activité agricole et la reconversion des terres à un aure usage. L'impact de ces changements de redistribution des terres sur les flux nets et les bilans d'eau et de carbone sera analysé, et leur conséquence éventuelle sur le climat est une étude envisagée à la fin du projet.

Le financement du projet ayant été limité, nous nous limitons dans un premier temps à mesurer les impacts du changement climatique sur l'offre agricole européenne d'une part, et à mesurer l'impact des changements d'usage des sols sur les bilans d'eau et de carbone d'autre part.

Un projet présenté dans le cadre de l'APR GICC2-2005 a pour but de compléter ces objectifs.

A.2. Objectifs et résultats attendus

A.2.1. Objectifs généraux

En s'appuyant sur quelques scénarios précis établis afin d'élaborer des études d'impacts, le projet s'appuie sur deux lignes de force : (1) Construire des indicateurs socio-économiques permettant d'évaluer les

 Construire des indicateurs socio-économiques permettant d'évaluer les différents scénarios du changement climatique et les mesures d'adaptation disponibles.

(2) Evaluer les changements de bilan d'eau, de carbone en Europe, sous l'influence du changement climatique et de la redistribution des surfaces agricoles.

Pierre-Alain Jayet tel:33(0)130815349 e-mail: j<u>ayet@grignon.inra.fr</u>

Unité Mixte de Recherche en Economie Publique, INRA-INAPG BP 1 78850 THIVERVAL-GRIGNON - tél: 01 30 81 53 49 - télécopie 01 30 81 53 68





ŝ

- Le financement du projet de recherche étant partiel, nous n'allons pouvoir qu'atteindre les objectifs intermédiaires suivants :
 - (1') Prendre en compte l'impact du changement climatique sur l'offre agricole européenne
- (2') Evaluer les changements de bilan d'eau, de carbone, sous l'influence de scénarios de changements d'usage des sols fictifs

changement climatique pour le secteur de l'agriculture européenne. Le second objectif est d'évaluer les disparités régionales induites par le changement climatique. Les dommages traités sont ici ceux affectant les biens marchands. L'horizon de temps retenu pour L'objectif premier est d'apporter une première estimation des effets induits du 'évaluation est de 100 ans.

A.2.2. Objectifs détaillés, résultats attendus

A.2.2.1. Introduction du changement climatique dans le modèle économique AROPAJ

correspondant à des données climatiques précises, il est possible de modifier les entrées L'introduction du changement climatique dans le modèle économique AROPAj est limité de régions française (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Picardie) et les cultures principales (blé, orges, maïs grain, tournesol, colza, pomme de terre, betterave). Il consiste pratiquement à remplacer une donnée ponctuelle du modèle économique (une charge en engrais, un rendement pour chaque culture et chaque agent du modèle économique) par une courbe associant à la quantité d'engrais un rendement de la culture. Chaque courbe Ces conséquences sont traduites par des modifications dans les choix des agents économiques du modèle et donc dans l'offre agricole aux différentes échelles spatiales du permise grâce au couplage réalisé avec le modèle STICS. Ce couplage a été réalisé dans le cadre d'un précédent projet GICC. Il n'est effectif actuellement que pour un nombre climatiques du modèle afin d'en mesurer les conséquences sur les courbes de rendement. modèle.

littérature (type IPCC) et les données issues des phases d'estimation et de calibrage des paramètres du modèle AROPAj. Cette base de données intègre les informations « sols » Lors de l'élaboration et de l'amélioration du modèle, on a veillé à la cohérence globale des modules et des couplages : couplage entre STICS et AROPAj pour l'élaboration des fonctions de rendement, les modules « épandage » (qui traite des liens entre les sous-produits de l'élevage et les surfaces) et « IPCC » (avec les relations techniques entre les activités de l'agriculture et de l'élevage et les émissions de GES). Le modèle AROPAj dans son ensemble, ainsi que le couplage avec STICS utilisent une unique base de données (ARTIX) qui intègre les relations techniques disponibles dans la ou « climat » nécessaires à l'association des modèles STICS et AROPAj.

du RICA daté de 1997, et une nouvelle version élaborée à partir des données 2001 de l'Union Européenne à 15 dans le cadre du STREP GENEDEC. D'autre part, le modèle Le projet comporte néanmoins quelques limites liées au modèle AROPAj et aux hypothèses faites. Le modèle fonctionne dans deux versions, une fondée sur les données est un modèle d'offre de court terme (période 1 an), de sorte que la projection d'une simulation à un horizon donné repose autant sur des hypothèses propres au modèle

e-mail : jayet@grignon.inra.fr Pierre-Alain Jayet tel: 33(0)130815349

Unité Mixte de Recherche en Economie Publique, INRA-INAPG BP 1 78850 THIVERVAL-GRIGNON - tel. 01 30 81 53 49 - telecopie 01 30 81 53 68



l'évolution du capital de l'exploitation - SAU², capital animal) que sur des hypothèses concernant l'évolution de la PAC. D'autres hypothèses doivent être faites, concernant la démographie des exploitants agricoles, le marché de la terre, aspects qui devraient être abordés dans le cadre de la réalisation du projet UE GENEDEC. (l'équilibre démographique du troupeau bovin à l'échelle d'une exploitation type¹,

sur la géographie – les Régions RICA - l'Orientation Technico-économique, et un indicateur d'altitude). D'autre part, avec le travail en cours concernant le couplage entre STICS et AROPAj, on peut étudier et « inventer » des couples « culture - localisation doute la possibilité de décliner les résultats à différentes échelles géographiques. Cela agricoles. L'unité de base du modèle est en effet le groupe-type, exploitation agricole virtuelle représentative d'une population statistique déterminée par une typologie fondée géographique » validés par l'approche agronomique d'un projet GICC précédent, et Malgré ces limites, les points forts du modèle sont nombreux. Le premier est sans nul permettra de mettre en évidence les disparités régionales mais également celles qui apparaissent au sein même des régions (entre les groupes - types) ou selon les activités intégrés aux groupes - types du modèle AROPAj.

2. Appariement des modèles ORCHIDEE et AROPAj

Deux types de problèmes sont abordés.

spatiale, chaque modèle Le premier problème renvoie aux questions d'échelle travaillant sur des espaces différentes

indépendamment d'un couplage à l'autre. En parallèle au travail sur l'appariement des Les scénarios climatiques et les itinéraires techniques de conduite des cultures, utilisés de façon indépendantes dans ORCHIDEE et AROPAj, nécessitent aussi d'être harmonisés. Le second problème tient au fait que les couplages AROPAj-STICS et ORCHIDEE-STICS ont été abordés de façon indépendante et qu'ils sont basés sur deux versions différentes du modèle STICS. De plus les itinéraires techniques ont été développés modèles, il nous faut travailler à l'harmonisation des versions du modèle agronomique. l'out ceci renvoie à un difficile problème de gestion de données, qui a focalisé les moyens engagés sur la période. ¹ Par extension ou abus de langage, les expressions « groupe type », « ferme type », « exploitation type » auront le même sens, et font référence à la typologie des exploitations agricoles du modèle AROPAj. En toute rigueur, on devrait distinguer les « fermes type » qui font référence à la nomenclature du RICA caractérisant le système de production, et le groupe type de fermes qui associe « ferme type », altitude, et taille économique, et qui renvoie à la classification et au regroupement des fermes types.

² Surface Agricole Utile

e-mail : jayet@grignon.inra.fr Pierre-Alain Jayet tel: 33(0)130815349

Rapport Intermédiaire - APR GICC 2002

Adaptation des systèmes européens de production agricole au changement climatique : premiers essais d'évaluation

B. Avancement du projet

B.1. Position par rapport aux objectifs initiaux

B.1.1 Avancement des travaux méthodologiques pour l'introduction de l'impact climatique sur les courbes de réponse à l'azote des cultures, résultats obtenus

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un programme GICC (APR 2002) et de la thèse de Caroline Godard (soutenne le 13 décembre 2005). Ce qui suit fait partie des résultats obtenus, et lorsque le modèle AROPAj est mentiomé (en particulier an niveau de la typologie), il s'agit de la version UE-15 développée en 2001 sur la base de données 1997. Préreisons qu'une nouvelle version a été développée en 2005 sur la base du RICA. 2002 dans le cadre d'un programme européen (GENEDEC, FP6-STREP 2004-2007) ³. Ces travaux ont mobilisé beaucoup de données de nature et d'origine différentes (en grande partie en provenance des statistiques européennes), pour lesquelles la question des droits d'arcès et les droits d'unitistion sont soumis à des règles stricus. En genéral le transfert des données brutes est proscrit. Pour la continuation des travaux, ces droits devront être prorogés en accord avec les services de la CE (essentiellement le CCR

B.I.I.I. Impact sur les rendements et les liens entre fertilisation azotée et rendement

Un premier travail a consisté à mesurer l'effet du changement climatique sur les courbes de réponse des cultures à l'azote sans tenir compte d'éventuelles adaptations (mêmes variétés, mêmes dates de semis). On trouvera une analyse détaillée et les résultats correspondants dans la thèse de Caroline Godard et dans le rapport de stage d'Edouard Baranger⁴. ⁴ Godard C. 2005, Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne : Application à l'évaluation des impacts du changement climatique, Godard, C. (sous la dir.

Ces travaux ont concerné les régions Midi-Pyrénées et Picardie, et les cultures du blé tendre et du mais. Trente années climatiques futures, issues du modèle Arpège de Météo France ont permis de simuler le climat futur (scénario SRES B2, qualifré de scénario moyen). Les fermes type sont celles de la version 2001 (RICA 1997) du modèle AROPAj.

Les figures n° 1 à 4 présentent les courbes de réponse à l'azote des cultures de blé et de mais de différents groupes-types en Picardie, pour les années indexées 3 à 30 (l'indexation ne doit pas être comprise comme une succession d'années, mais comme une réalisation d'un climat aléatoire parmi 30 situations possibles). Sur chaque graphique est représentée en bleu la courbe de réponse à l'azote obtenu pour l'année 1997 et servant de rééferece pour comparaison. Les rendements sont donnés en *tr*ha. Pour la culture de blé (selon l'exemple présenté figure n°1), nous constatons que les courbes sont bien regroupées au-dessus de la courbe de référence (RICA 1997). Ces courbes ont toutes la même évolution et l'écart entre les valeurs minimales et maximales est quasi constant et égale à 4 t/na. Concernant un autre groupe type de la Région (selon l'exemple présenté figure n°2) les courbes présentent un écurt de rendement important de 8.5 t/ha entre les valeurs minimales courbes présentent un écurt de rendement important de dessus des courbes pour de fables doses. La courbe de référence de 1997 se situe audessus des courbes pour des doses d'azote inférieures à 130 kg/ha puis rejoint les courbes proviement des paranètres d'azote. Les différences entre les deur séries de courbe proviement des paranètres d'entrée de STICS inférées à partir de la méthodologie développée par C. Godard (en particulier le sol et l'itiméraire technique, voir ci-desous).

de Roger-Estrade, J.). Thèse de doctorat en agronomie (Ecole doctorale ABIES, Ademe, Inna, INA-PG), - Grignon : INRA UMR Economie Publique, 2005. - 278 p: ill, bib, cartes, tab.

Baranger E., 2005, Changement climatique et évolution des rendements des grandes cultures en France, Baranger, E. (sous la dir. Jayet, P.A. et Godard, C.). - Mémoire de fin d'études : Master Professionnel Productions Végétales, Options Sciences Agronomiques (Université de Rennes, Inra, Ademe). - Grignon : INRA. UMR Economie Publique, 2005. - [45 p.] : ill, bib, cartes, tab.

³ On évoquera indifféremment les groupes type, ou les fermes type, lorsqu'il s'agit des groupes d'exploitations agricoles issus de la typologie du modèle AROPAj.





Eigure n°4: Courbes de réponse à l'azote du mais en Picardie (t/ha) (groupe n°9). **R0** et **N0** indiquent le rendement et la quantité d'azote de référence de 1997 du groupe 9 (Godard, 2005).

Pour la culture de blé nous obtenons des résultats totalement différents selon les groupes-types. Le climat étant commun, seuls les facteurs agronomiques peuvent expliquer ces différences. Par rapport au groupe-type 8, les résultats du groupe-type 9 sont moins bons et ont une plus grande variabilité 1, 84.9% de variabilité par rapport au rendement maximum à la dose de référence au lieu de 37.6%. Le sol du groupe-type 9 set moins profond (de moins 40 cm), plus calcaire et plus caillouteux que celui du groupetype 8 ce qui entraîne une réserve en eau utile (RU) plus faible. De ce fait la plante supporte moins bien le stress hydrique des mois de mai à juillet (période de remplissage des grains) imposé par un climat fur, plus chaud et plus sec. Par ailleurs, la variété semée dans le groupe-type 9 est plus tardive que celle du groupe-type 8. Ceci a pour conséquence de décaler la période de remplissage des grains vers des jours encore plus stress hydrique et à l'échaudage physiologique.

La grande variabilité dans les courbes de réponse à l'azote du mais s'explique essentiellement par l'importante variabilité climatique. En effet, pien que les variétes, les sols et les précédents soient tous différents entre les deux groupes, nous observons la même variabilité (100%) par rapport à la valeur du rendement maximal à la dose d'azote de référence. Le mais est une culture d'été qui a d'importants besoins en eau durant les mois de juin à août. Dans ces conditions, et en rappelant que cette culture n'est pas

irriguée en Picardie, la culture du maïs est soumise directement aux aléas climatiques. L'analyse des années favorables à la culture du maïs a révélé que seules les années plus pluvieuses et moins chaudes que la moyenne permettent l'obhenion de rendements supérieurs à ceux de 1997. Dans ces nouvelles conditions climatiques, la culture de maïs devient très risquée en Picardie car seulement un tiers à un quart des années atteint le rendement de 1997.

Les changements climatiques entraînent de plus fortes températures (augmentation de 2.2 °C des minimales et de 0.8 °C des maximales) et de plus faibles pluviométries principalement pour les mois de mai à août (diminution mensuelle moyenne de 21 mm) par rapport aux conditions climatiques de 1997. Dans ces conditions et afin d'obtenir un niveau de rendement si ce n'est supérieur, au moins égal à celui de 1997, il est nécessaire de modifier les pratiques culturales. L'utilisation de variétés plus précoces en blé tendre d'inver permet de limiter les risques d'été comme le mais, l'irrigation devient alors indispensable en Picardie afin de limiter les impacts des aléas climatiques (principalement sécheresse) pendant la période estivale.

En région Midi-Pyrénées (se reporter à la thèse de Caroline Godard), pour la culture de blé, les gains de rendements sont importants en conditions futures. Cette augmentation s'explique dans un premier temps par l'effet de la fertilisation carbonée du CO2 mais il ne faut pas oublier que les facteurs climatiques (températures et précipitations) et techniques jouent aussi un rôle essentiel. Pour la culture de mais, la perte de rendement de 16% ne peut s'expliquer climatiquement que par la hausse des températures par rapport au climat de 1997. En effet cette culture est irriguée telse paramètres de simulation de STICS, font que l'irrigation est déclenchée de façon à ce que le mais ne subisse aucun stress hydrique. Dans ces conditions, la variét implantée, bien que très précoce et ayant de forts besoins en somme de température, ne semble pas être adaptée à des températures encore plus chaudes et ce principalement pendant les mois de mai à juillet (+ 1.7 °C sur les moyennes mensuelles par rapport aux données de 1997). La variabilité des rendements est de 57% par rapport au rendement maximal à la dose d'azote de référence de 1997.

La culture de blé en région Midi-Pyrénées semble avoir un gain de productivité potentiel important. Le climat de moyenne et de haute montagne semble être tres hien adapté pour la production de blé dans des conditions climatiques futures. En effet, d'une part la modification des températures permet de limiter à la fois les risques de gel et d'échaudage physiologique et d'ature part la plus faible diminution de la pluviométrie permet de maintenir le statut hydrique de la plante à un niveau optimal. Pour le mais, bien qu'il s'agisse d'une plante très bien adaptée aux climats chauds et humides, la variété implantée, bien que très précoce, ne semble plus être adaptée aux nouvelles conditions climatiques. Le choix et la sélection de vanété encore plus précoce, dans des conditions hydriques non-limitantes, serait donc indispensable si l'on veut maintenir un rendement proche de celui de 1997. Comme nous avons pu le constater, le gain de rendement pour la culture de blé n'est pas une évidence en tous lieux dans un contexte climatique fluur. Contrairement à tous préjugés, ce n'est pas en Picardie où actuellement les rendements sont parmi les melleurs de France que nous observons les plus importantes augmentations de production et ceci pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, à concentration en CO2 égale, les deux régions se différencient sur plusieurs critères climatiques importants. D'une part, la diminution de pluviométrie pour la région Picardie est plus forte que pour la région Midi-Pyrénées où parfois même celleci peut augmenter. D'autre part, l'augmentation des températures minimales et maximales est beaucoup plus forte que pour la région Midi-Pyrénées où, selon l'altitude, celles-ci peuvent même diminuer. Par ailleurs, les variétés implantées en Picardie n 1997, grâce à un contexte agro-climatique très favorable, exprimaient déjà quasiment leur potentiel génétique maximal contrairement aux variétés implantées en Midi-Pyrénées.

Concernant la culture de maís, nous remarquons une diminution générale des rendements quelle que soit la région. La diminution et la variabilité des rendements sont plus fortes pour la région. Picardie. Cette différence s'explique par le fait que pour cette région la culture est non irriguée. Par alleurs, l'augmentation des températures modifie complètement la carate de distribution des sommes de températures au niveau du territoire français. En effre, si nous considérons une augmentation moyenne des températures de 1.5°C, pour une culture de mais dont le cycle de développement est de environ 195 jours. l'augmentation des sommes de températures des variétés qui était bien adaptée à chaque zone de production en 1997, ne l'est plus sous des conditions climatiques futures plus chaudes. L'adaptation future des variétés aux zones de production engendrera une renonié de la précocité vers le nord de la France. Pour les régions de production, uvellement les plus au sud, se posera alors le problème de sélectionne de novelles variétés encore plus précoces si l'on veut maintenir une production très exigeante en eau, dans ces zones géographiques.

L'interprétation agronomique de ces résultats nous a permis de comprendre comment évolueront les rendements dans des conditions climatiques futures toutes choses égales par ailleurs. En effet, dans cette étude seul le climat est modifié. L'évolution, sous un contexte climatique futur, des zones de cultures, des variétes, des dates de semis mais aussi des maladies, des parasites et des adventices des cultures reise pas prise en compte. Certains modèles agronomiques sont capables de simuler ces évolutions (ex : modèle ARCWHEAT pour la prévision des dates de semis). Ce genre de résultats permettrait daffiner les conditions de simulation avec le modèle STICS et d'améliorer les prévisions futures de rendement.

B.1.1.2. Impact sur les rendements et charges dans le modèle AROPAj

Le travail précédent basé à la fois sur des hypothèses agronomiques et économiques, a pour perspectives l'utilisation des courbes de réponse à l'azote dans un modèle économique affin de déterminer l'évolution de la rentabilité des exploitations agricoles. Nous allons maintenant présenter et analyser les premiers éléments économiques que nous apportent les courbes de réponse à l'azote. A partir de ces nouvelles courbes de rendements des cultures, il est possible de calculer pour chaque courbe un nouvel optimum économique "futur" de coordonnée (R1, N1). Cet optimum correspond au point de la courbe où la dérivée est égale au raport du prix de l'engrais sur celui de la culture. Afin de n'observer que l'effet du changement de climat, nous avons considéré pour l'estimation des optimums économiques les prix des cultures et des engrais de l'année 1997. Et en première hypothèse, on ne modifie pas le mode d'ingation

Les figures n°5 et 6 représentent les résultars obtenus pour les cultures de blé et de mais en Picandie. Sur chaque figure, les losanges, les triangles et les croix représentent respectivement les optimuns économiques futurs, leur moyenne et les optimuns de 1997. Concernant la culture de blé, nous constatons que, pour l'ensemble des groupes-types, le niveau de production optimal augmente. Le gain de production est de 5.6 t/ha pour le groupe 9 et de 4.8 t/ha pour le groupe 8. Quant aux quantités d'azote optimales, elles sont très élevées avec ur evaleur moyenne de 575 U/ha. La variabilité des rendements (de 4,5 à 21.8 t/ha) et des doses d'azote (185 à 3066 kg/ha) optimums pour le groupe 9 est très importante. Cette variabilité est beaucoup plus faible pour le groupe 8.



Figure n°5: Optimums économiques calculés sur les courbes de réponse à l'azote des années 3 à 30 pour la culture de blé des groupes-types 8 et 9 ons6 *G8* et *G9* de Picardie. Chaque optimum est défini par le couple (RI, NI) qui indique le rendement et la dose d'azote optimum de chaque courbe. Les triangles représentent les optimums de 1997 (Godard, 2005). Les croix représentent les optimums de 1997 (Godard, 2005).



Figure n°6 : Optimums économiques calculés sur les courbes de réponse à l'azote des années 3 à 30 pour la culture de mais des groupes-types 8 et 9 notés **G8** et 9 de Picardie. Chaque optimum est défini par le couple (**ZI**, **NI**) qui indique le rendement et la dosse d'azote optimum de chaque courbe. Les triangles représentent les optimums futurs moyen. Les croix représentent les optimums de 1997 (Godard, 2005).

Pour la culture de maïs, nous constatons une diminution des rendements de 2.7 tha pour le groupe 9 et de 0.3 thal e groupe 8. Les dosse d'azote optimales restent élevées par amport aux rendements optimaux (305 U/ha pour les groupe 9 et 164 U/ha pour le groupe 9). La variabilité des rendements (de 0 à 15 tha) et des dosse d'azote (- 745 à 992 kg/ha) optimums est très importante. Par ailleurs nous constatons que certaines valeurs optimentes sont nulles (compte tenu de la contrainte implicite de positivité).

D'autre part, il faut rappeler que dans le calcul de ces nouveaux optimums économiques, les prix de la culture et de l'engrais sont les mêmes que pour l'année 1997, ce qui ne permet pas un calcul des optimums en conditions économiques futures. Nous n'observons ainsi que l'effet dù au changement climatique et non pas celui de l'évolution des prix. Dans ces conditions, nous ne pouvons identifier qu'une tendance de l'évolution des prix. Dans ces conditions, nous ne pouvons identifier qu'une tendance de l'évolution des optimums économiques. Une étude complémentaire, réalisée en intégrant des prévisions économiques futures (prix des cultures et des engrais en 2100, apporterait des informations plus précises et plus fiables sur les valeurs des optimums économiques futurs.

B.1.2 Avancement des travaux concernant l'appariement des modèles ORCHIDEE et AROPAj

Les premiers travaux sur le couplage entre ORCHIDEE et AROPAj ont débuté courant août avec l'embauche d'un CDD spécifiquement dédié à cette partie. Il s'agit essentiellement d'aborder les questions informatiques de transfert de variables d'un modèle à l'autre et de traiter les questions d'échelle spatiale. Les modèles travaillent à des échelles différentes, mais partiellement adaptables.

AROPAj repose sur une base régionale (les Régions "RICA" sont proches des régions "NUTS-III" de la nomenclature européenne), ces régions comprenant plusieurs groupestypes qu'il n'est en théorie pas possible de localiser au sein de la région (ces fermes types sont construites à partir de méthodes de classification automatique intégrant la contrainte de confidentialité imposée par l'UE sur les données). ORCHIDEE repose sur une grille régulière en degrés de latitude et de longitude, mais ajustable en termes de résolution. Elle est donc de nature différente de celle d'AROPAj et un travail sur le format des données d'entrée et de sortie est le préalable au dialogue des 2 modèles. Chaque pixel de la grille d'ORCHIDEE-STICS est une mosaïque composée de 14 différents types fonctionnels de plante (PFT), 9 types naturels, 2 types de prairies regroupant à la fois les prairies naturelles et anthropiques, et 3 types de cultures. C'est la fraction de chaque pixel couverte par chaque PFT qui permet de les distinguer. En mode standard (nors couplage ORCHIDEE-AROPA), ORCHIDEE-STICS lit ces fractions dans une « carte de végétation » base de données contenant une distribution des biomes dans une « carte de végétation » base de données contenant une distribution des biomes terrestres, sur une grille régulière, à une résolution en général supérieure (~5km) à celle à laquelle le modèle est utilisé (ici ~50km, soit 0,5°). En mode "coupé" i les informations concernant les fractions occupées par les endures en painés proviennent d'AROPAj qui distingue 30 catégories de cultures ou autres utilisations agricoles des terres par région associées différemment par groupe-type d'exploitations agricoles (au sens d' AROPAj). Il a donc dé nécessaite de développer deux tables de correspontance, qu'il nous faudra rendre automatiques, l'une entre les définitions des surfaces dans les 2 modèles et l'autre entre les définitions des catégories de cultures.

Nous avons, dans un premier temps, agrégé les groupes-types par région pour n'avoir plus qu'une valeur par catégorie de cultures, ce en attendant éventuellement que les groupes-types puissent être affectés à des sous-zones localisées de la région. Nous avons ensuite regroupé les 30 catégories en 5 catégories correspondant aux 3 PFTs agricoles et aux 2 PFTs de prairies d'ORCHIDEE. Ce regroupement a été fait selon les critères type photosynthétique C3/C4, type de couvert prairie/culture et type de culture C3 d'hiver/C3 de printemps. Le PFT "prairies en C3' d'ORCHIDEE regroupe ainsi les légumineuses fourragènes, la friche, le gel, la jachère et les différents types de prainies. Le PFT "prairies en C4" n'est pas représenté en Europe (type d'écosystème plus adapté aux conditions tropicales). Le PFT "cultures en C4" regroupe le mais grain et le mais fourrager. Le PFT "cultures en C3 d'hiver" regroupe le blé tendre lorge et le colza. Le PFT "cultures en C3 d'hiver" regroupe le blé tendre lorge et le colza. Le PFT "cultures en C3 d'hiver" regroupe le blé tendre lorge et le colza. Le PFT "cultures en C3 d'hiver" regroupe le blé tendre lorge et le colza. Le PFT "cultures en C3 d'hiver" regroupe protédiemex et les lignmes de plein champs. La somme des fractions occupées par ces 5 PFTs équivant à 100% de la Surface Agricole Utile (SAU). La SAU est la soule partie

qu'AROPAj fournit à ORCHIDEE qui doit lire la composition de surface naturelle sur sa carte de végétation initiale. Le tableau de correspondance est donné ci-dessous.

Le transfert des fractions de surface occupée par ces 5 nouvelles catégories de cultures (correspondant donc aux 5 PFTs herbacés d'ORCHIDEE) des régions NusII vers les pixels qui la composent (ou bien sont à la frontière avec une autre région) a cxigé de disposer d'un fichier de correspondances entre ces régions et les pixels de taille dépendant de la résolution choisie (ici $0, 5^{\circ} \times 0, 5^{\circ})$.

Ce fichier de correspondances a été mis à notre disposition par Alberte Bondeau, dans le cadre d'une collaboration avec le PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research, Allemagne). Le travail de Stephan Julich, stagiaire SIG au PIK semestre d'hiver 2004-2005, a permis de fabriquer ce fichier en superposant les polygones représentant les NutsII aux pixels à 0,5°x0,5° de la grille du mobelle LPJ, faisant partie des modèles de végetation du même type qu'ORCHIDEE. Ces polygones NutsII° ont été eux-mêmes obteux à partir des polygones NutsIII transmis par la commission Européenne à Franc Badeck et Till Scherzel, respectivement chercheur et stagiaire au PIK, dans le cadre de travaux faisant appel aux outils SIG.

Une fois connues les fractions de mer et des 3 régions NutsII principales composant chaque pixel, la fraction occupée par chaque PFT au sein de l'agriculture par pixel est calculée comme étant la moyenne pondérée par la contribution en surface de chacun des PFTs à l'agriculture de ces régions (la figure n 7 donne une illustration du problème avec un maillage qui diffère de celui d'ORCHIDEE).



Un premier test est effectué pour vérifier la sensibilité des variables simulées par ORCHIDEE à la redistribution de surfaces délivrées par AROPAj ou par un scénario substitut. Dans le cadre de cette première petite étude-test du couplage AROPAJ-ORCHIDEE-STICS, nous avons chois la régioni la région is 80%. Nous avons réalisé une étude de sensibilité au seul changement d'usage des sols (à climat constant). La zone d'étude choisie comporte 3X3=9 pixels à la résolution de 0.5°WM. Less fractions de PFT agricoles et de prarires sont donc fournis par AROPAj après transformation des données d'après notre méthodologie exploitant les tables de correspondance présentées ci-dessus. ⁵ Nomenclature of Units for Territorial Statistics (Nuts) EUROPEAN COMISSION (2003): European regional statistics. Reference guide. Theme 1 : General Statistics. Luxembourg]

Trois simulations ont été réalisées avec ORCHIDEE-STICS, la première correspond à une simulation de l'état actuel de la région Picardie. Les deux aures expériences consistent à appliquer des scénarios d'usage des sols correspondent gossièrement à une remontée des cultures du Sud vers le Nord. Les scénarios construits consistemt à appliquer à la région Picardie l'utilisation des sols de régions plus au Sud, à savoir les régions IIe de France et Aquitaine. Les données utilisées correspondent aux résultats du modèle AROPAj 2001. Pour chaque scénario on retient le pourcentage d'utilisation du sol de chaque culture et on l'applique à la région Picardie. Le 2ème scénario est le plus extrême maximisant ainsi la réponse des flux et bilans d'eau et de carbone. En comparant ces simulations les unes aux autres pour plusieurs variables représentatives des flux ehangement d'usage des surfaces agricoles. Les simulations ont été réalisées sur plusieurs années accenture to uténet une flux en la variabilité climatique naurelle peut certaines années accenture ou atténuer un effet.



La figure n°8 caractérise pour le pixel centré sur la longitude 2°Est et la latitude 50.5°Nord l'évolution des fractions de surface occupée par les 5 PFTs entre l'état initial et l'état après application des 2 scenarii. Ce pixel est celui de Picardie ayant la surface garicole la plus importante. Le scénario « Aquitaine » augmente très fortement la part couverte par les cultures en C4 (mäis) au détriment surtout des cultures C3 d'hiver mais aussi des cultures C3 de printemps. Le scénario « Ile-de-France », quant à lui, réduit la proportion de prairies C3 au profit des cultures C3 de printemps, mais de façon moins drastique.

scénarios permet facilement de visualiser la saison de croissance de la végétation. Il France », l'un au printemps et l'autre en été. Ils correspondent au moment où les cultures C3 d'hiver et les cultures C3 de printemps et prairies C3 sont au maximum de leur croissance. En revanche, le LAI dans le cas du scénario « Aquitaine » ne présente qu'un pic, correspondant au moment où les cultures en C4 comme le maïs ont atteint leur indice foliaire maximum. Le LAI est plus faible en hiver-début de printemps car peu de cultures dans le cas du scénario « Ile de France » que dans l'état initial car les prairies C3 ont été remplacées par des cultures en C3 de printemps ayant un cycle beaucoup plus court et faisant l'objet d'une récolte en fin d'été. Cette première observation montre que le cycle saisonnier de la croissance foliaire à l'échelle du pixel est très dépendant de la phénologie des cultures qui le composent (ainsi que des dates auxquelles elles sont semées). Or la feuille étant le support de la plupart des échanges entre la végétation et l'atmosphère, une modification de la répartition de cultures dans chaque pixel va se répercuter dans la L'indice foliaire moyen (LAI, figure n°9) simulé pour ce pixel dans les différents présente deux pics dans le cas de l'occupation initiale des sols et du scénario « Ile-ded'hiver ont été semées. On comprend aussi que le LAI est plus faible en automne-hiver saisonnalité des flux d'énergie, d'eau et de carbone ainsi qu'éventuellement dans leur intégrale annuelle.







B.2. Perspectives et valorisations

B.2.1. Perspectives à court terme

On peut les résumer de la façon suivante :

- Travailler à la mise en forme des données (ARTIX), de façon à traiter les problèmes de cohérence entre les modèles (itinéraires techniques, climats, sols, versions STICS);
- Généraliser ce qui est actuellement en place pour quelques régions et quelques cultures, automatiser l'appariement des modèles ORCHIDEE et AROPAj ;
 Anne encourter a procedure run occler les motibues d'actuelles accounter actuelles actuelles accounter actuelles actuelles
- Avant toute extension à l'échelle UE, régler les problèmes de droits d'accès aux données, compte tenu de l'enchevêtrement des programmes de recherche UE et nationaux qui font appel à ces données (sols, climat, RICA,...);
- Ajuster les courbes de réponse issues du couplage STICS-AROPAJ pour les scénarios futurs;
 - Choisir le langage informatique le plus approprié à la communication entre les modèles.

B.2.2. Perspective à plus long terme

Un projet a été déposé lors de l'APR GICC2 d'octobre 2005, afin de poursuivre ces travaux et de mesurer d'une part les dommages du changement climatique sur l'agriculture européenne et évaluer les stratégies, d'autre part les rétroactions du changement d'usage des sols sur le climat. Par ailleurs, un travail sur la localisation des fermes type du modèle AROPAj est en phase de démarrage dans le cadre d'un programme européen. Nous pensons l'utiliser pour améliorer la qualité des correspondances évoquées dans la section B.1.2.

L'une des questions techniques qui devra être abordée est celle de la prise en compte pour l'adaptation de variables d'entrée du modèle STICS telles que les atares de semis et les nouvelles variédés. Plus généralement, l'une des question que pose le coupage de modèle aussi différents que peuvent l'être AROPAj (économique, statique, du niveau des agents économiques) et ORCHIDEE (physique sur la rétroaction du couvert végétal sur le climat, à une échelle « régionale », dynamique) est celle de la cohérence des données en entrée et des résultats. En exemple pour les données, il y a le modèle STICS utilisé par les deux modèles pré-cités, STICS dont les paramètres d'entrée sont eux-mêmes déterminés de façon indépendante entre les deux modèles AROPAj et ORCHIDEE. alors que sont concenées les mêmes productions à visibilité économique (les rendements), tandis qu'ORCHIDEE met l'accent sur le LAI. Il faudrait alors s'assurer que les renduis qu'ORCHIDEE met l'accent sur le LAI. Il faudrait alors s'assurer que les rendement et LAI catculés sont cohérents.

B.2.3. Valorisation

L'avancement du projet a notamment été possible à partir des travaux réalisés dans le cadre de la thèse de Caroline Godard cofinancée par l'ADEME et l'INRA. Les valorisations futures concerneront les thèses d'Elodie Debove (UMR Economie Publique) et de Pascalle Smith (CEA-LSCE).

Bibliographie

- Alcamo, J., Leemans, R., & Kreileman, E. 1998. Global Change Scenarios of the 21st Century : Results from the IMAGE 2.1 Model. Pergamon.
- Amir, J., & Sinclair, T. R. 1991. A Model Of The Temperature And Solar-Radiation Effects On Spring Wheat Growth And Yield. *Field Crops Research*, 28(1-2), 47.
- Arneth, A., Sitch, S., Bondeau, A., Butterbach-Bahl, K., Foster, P., Gedney, N., De Noblet-Ducoudré, N., Prentice, I. C., Roulet, N., Sanderson, M., Thonicke, K., Wania, R., & Zaehle, S. in prep.. From biota to chemistry and climate : Towards a comprehensive description of trace gas exchange at the land surface. *Global Change Biology*.
- Arnold, J. G. 1994. SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service.
- Arnold, W., & Sherwood, H. 1959. Energy Storage in Chloroplasts. Journal of Physical Chemistry, 63(1), 2–4.
- 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. Rapport INRA.
- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., & Hicke, J. A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations : implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12(3), 191.
- Bacour, C., & Breon, F. M. 2005. Variability of biome reflectance directional signatures as seen by POLDER. *Remote Sensing Of Environment*, 98(1), 80.
- Bacour, C., Baret, F., Beal, D., Weiss, M., & Pavageau, K. 2006. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAIxC(ab), from top of canopy MERIS reflectance data : Principles and validation. *Remote Sensing Of Environment*, **105**(4), 313.
- Baker, D. F., Law, R. M., Gurney, K. R., Rayner, P., Peylin, P., Denning, A. S., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y. H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Prather, M., Pak, B., Taguchi, S., & Zhu, Z. 2006. TransCom 3 inversion intercomparison : Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO2 fluxes, 1988-2003. Global Biogeochemical Cycles, 20(1), -.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., & Evans, R. 2001. FLUXNET : a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin* of the American Meteorological Society, 82(11), 2415–2434.
- Ball, J. T., Woodrow, I. E., & Berry, J. A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. *Progress in Photosynthesis Research*, 4, 221–224.
- Baumgardner, M. F., Silva, L. F., Biehl, L. L., & Stoner, E. R. 1985. Reflectance Properties Of Soils. Advances In Agronomy, 38, 1.

- Belelli Marchesini, L., Papale, D., Reichstein, M., Vuichard, N., Tchebakova, N., & Valentini, R. 2007. Carbon balance assessment of a natural steppe of southern Siberia by multiple constraint approach. *Biogeosciences*, 4, 581–595.
- Beniston, M. 2004. The 2003 heat wave in Europe : A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, **31**(2).
- Betts, R. A. 2001. Biogeophysical impacts of land use on present-day climate : near-surface temperature change and radiative forcing. Atmospheric Science Letters, 2(1-4), 39–51.
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., & Dubuc, J. P. 1997. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. Agriculture Ecosystems & Environment, 63(1), 61-66.
- Bonan, G. B. 1999. Frost followed the plow : Impacts of deforestation on the climate of the United States. *Ecological Applications*, **9**(4), 1305.
- Bonan, G. B. 2002. *Ecological climatology : concepts and applications*. New York : Cambridge University Press.
- Bondeau, A., Smith, P.C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Mueller, C., Reichstein, M., & Smith, B. 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13(3), 679–706.
- Boote, K. J., Jones, J. W., Hoogenboom, G., & Pickering, N. B. 1998. The CROPGRO model for grain legumes. Understanding Options for Agricultural Production.
- Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P., & Monfray, P. 2000. A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology*, 6(7), 709-725.
- Boucher, O., Myhre, G., & Myhre, A. 2004. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics*, 22(6-7), 597.
- Bounoua, L., DeFries, R., Collatz, G. J., Sellers, P., & Khan, H. 2002. Effects of land cover conversion on surface climate. *Climatic Change*, 52(1-2), 29.
- Bousquet, P., Peylin, P., Ciais, P., Le Quere, C., Friedlingstein, P., & Tans, P. P. 2000. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 290(5495), 1342–1346.
- Brisson, N., & Delecolle, R. 1992. Plant Development in Crop Simulation-Models. Agronomie, 12(3), 253–263.
- 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., & Delecolle, R. 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie, 18(5-6), 311–346.
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeau, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M. H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., & Justes, E. 2002. STICS : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. Agronomie, 22(1), 69–92.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J. P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., & Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 309–332.
- Brovkin, V., Ganopolski, A., Claussen, M., Kubatzki, C., & Petoukhov, V. 1999. Modelling climate response to historical land cover change. *Global Ecology And Biogeography*, 8(6), 509.

- Brovkin, V., Sitch, S., von Bloh, W., Claussen, M., Bauer, E., & Cramer, W. 2004. Role of land cover changes for atmospheric CO2 increase and climate change during the last 150 years. *Global Change Biology*, 10(8), 1253.
- Büttner, G., Feranec, J., Jaffrain, G., Mari, L., Maucha, G., & Soukup, T. 2004. The european CORINE Land Cover 2000 project. *EARSeL eProceedings*, **3**(3), 331–346.
- Challinor, A. J., Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., Slingo, J. M., & Grimes, D. I. F. 2004. Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**(1-2), 99–120.
- Challinor, A. J., Wheeler, T. R., Slingo, J. M., & Hemming, D. 2005. Quantification of physical and biological uncertainty in the simulation of the yield of a tropical crop using present-day and doubled CO2 climates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, **360**(1463), 2085–2094.
- Chen, Y., Churkina, G., & Heimann, M. 2007. A comparison of regional climate variables between various data sources. Technical Report. Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Germany.
- Choisnel, E. 1977. Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol. La Météorologie, 6(11), 103–133.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J. F., Sanz, M. J., Schulze, E. D., Vesala, T., & Valentini, R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529–533.
- Ciais, P., Bousquet, P., Freibauer, A., & Naegler, T. 2007. Horizontal displacement of carbon associated with agriculture and its impacts on atmospheric CO2. *Global Biogeochemical Cycles*, **21**(2), -.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., & Berry, J. A. 1992. Coupled Photosynthesis-Stomatal Conductance Model For Leaves Of C4 Plants. Australian Journal Of Plant Physiology, 19(5), 519–538.
- Cramer, W., Bondeau, A., Schaphoff, S., Lucht, W., Smith, B., & Sitch, S. 2004. Tropical forests and the global carbon cycle : impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series B : Biological Sciences*, **359**(1443), 331–343.
- Davin, E. L. 2008. Etude de l'effet biophysique des changements d'occupation du sol sur le système climatique. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Davin, E. L., de Noblet-Ducoudre, N., & Friedlingstein, P. 2007. Impact of land cover change on surface climate : Relevance of the radiative forcing concept. *Geophysical Research Letters*, 34(13).
- De Noblet-Ducoudré, N., Gervois, S., Ciais, P., Viovy, N., Brisson, N., Seguin, B., & Perrier, A. 2004. Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. Agronomie, 24(6-7), 397–407.
- de Rosnay, P., & Polcher, J. 1998. Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrology And Earth System Sciences*, **2**(2-3), 239.
- de Wit, C. T. 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Centre for Agricultural Publishing and Documentation.

- de Wit, C. T., Brouwer, R., & de Vries, Fwtp. 1970. The simulation of photosynthetic systems. Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- DeFries, R., & Eshleman, N. K. 2004. Land-use change and hydrologic processes : a major focus for the future. *Hydrological Processes*, 18(11), 2183.
- DeFries, R., Hansen, A., Turner, B. L., Reid, R., & Liu, J. G. 2007. Land use change around protected areas : Management to balance human needs and ecological function. *Ecological Applications*, 17(4), 1031.
- Ducoudré, N. I., Laval, K., & Perrier, A. 1993. Sechiba, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General-Circulation Model. *Journal of Climate*, 6(2), 248–273.
- Durand, R. 1967. Effect of Temperature and Radiation on Growth. Annales De Physiologie Vegetale, 9(1), 5-?
- Durand, R., Bonhomme, R., & Derieux, M. 1982. Optimal Base Temperature For Calculating Degree-Day Sums, As Applied To Maize (Zea-Mays-L). Agronomie, 2(7), 589.
- Enting, I. G., Trudinger, C. M., Francey, R. J., & Granek, H. 1993. Synthesis Inversion of Atmospheric CO₂ Using the GISS Tracer Transport Model. Tech. rept. 29. CSIRO Div. Atmos. Res., Australia.
- Evans, L. T. 1997. Adapting and improving crops : The endless task. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B Biological Sciences, 352(1356), 901–906.
- Farquhar, G. D., & Sharkey, T. D. 1982. Stomatal Conductance And Photosynthesis. Annual Review Of Plant Physiology And Plant Molecular Biology, 33, 317.
- Farquhar, G. D., Caemmerer, S. V., & Berry, J. A. 1980. A Biochemical-Model Of Photosynthetic Co2 Assimilation In Leaves Of C-3 Species. *Planta*, 149(1), 78.
- Feddema, J., Oleson, K., Bonan, G., Mearns, L., Washington, W., Meehl, G., & Nychka, D. 2005a. A comparison of a GCM response to historical anthropogenic land cover change and model sensitivity to uncertainty in present-day land cover representations. *Climate Dynamics*, 25(6), 581.
- Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Mearns, L. O., Buja, L. E., Meehl, G. A., & Washington, W. M. 2005b. The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science*, **310**(5754), 1674.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. 1998. Primary production of the biosphere : Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237.
- 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 Biogeochemical Cycles*, 10(4), 603–628.
- Francey, R. J., & Tans, P. P. 1987. Latitudinal Variation In O-18 Of Atmospheric Co2. Nature, 327(6122), 495.
- Friedlingstein, P., Joel, G., Field, C. B., & Fung, I. Y. 1999. Toward an allocation scheme for global terrestrial carbon models. *Global Change Biology*, 5(7), 755-770.
- Frossard, E., LopezHernandez, D., & Brossard, M. 1996. Can isotopic exchange kinetics give valuable information on the rate of mineralization of organic phosphorus in soils? *Soil Biology* and Biochemistry, 28(7), 857–864.

- Gastal, F., & Lemaire, G. 2002. N uptake and distribution in crops : an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, **53**(370), 789–799.
- Gate, P. 1995. Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. ITCF & Lavoisier, Paris.
- Genermont, S., Cellier, P., Morvan, T., Flura, D., & Laville, P. 1996. Measuring ammonia volatilization by the aerodynamic method under actual field conditions. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Iii-Sciences De La Vie-Life Sciences*, **319**(12), 1145–1151.
- Gervois, S. 2004. Les zones agricoles en Europe : évaluation de leur rôle sur les bilans d'eau et de carbone ; sensibilité de ces bilans aux changements environnementaux sur le vingtième siècle. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Gervois, S., De Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Ciais, P., Brisson, N., Seguin, B., & Perrier, A. 2004. Including Croplands in a Global Biosphere Model : Methodology and Evaluation at Specific Sites. *Earth Interactions*, 8(16), 1–25.
- Gervois, S., , Ciais, P., De Noblet-Ducoudré, N. andBrisson, N., Vuichard, N., & Viovy, N. 2008. Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century. *Global Biogeochemical Cycles*, in press.
- Gitz, V., & Ciais, P. 2003. Amplifying effects of land-use change on future atmospheric CO2 levels. *Global Biogeochemical Cycles*, **17**(1). 1024.
- Goudriaan, J., Goot, J. J. R., & Uithol, P. W. J. 2001. Productivity of agro-ecosystems. In : Roy, J., Saugier, B., & Mooney, HA (eds), *Terrestrial global productivity*. Academic Press.
- Govindasamy, B., Duffy, P. B., & Caldeira, K. 2001. Land use Changes and Northern Hemisphere Cooling. Geophysical Research Letters, 28(2), 291.
- 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**(1), 29–51.
- Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., Rayner, P. J., Baker, D., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y. H., Ciais, P., Fan, S., Fung, I. Y., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Peylin, P., Prather, M., Pak, B. C., Randerson, J., Sarmiento, J., Taguchi, S., Takahashi, T., & Yuen, C. W. 2002. Towards robust regional estimates of CO2 sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 415(6872), 626-630.
- Habekotte, B. 1997. Indentification of strong and weak yield determining components of winter oilseed rape compared with winter wheat. European Journal Of Agronomy, 7(4), 315.
- Hay, R. K. M. 1995. Harvest Index a Review of Its Use in Plant-Breeding and Crop Physiology. Annals of Applied Biology, 126(1), 197–216.
- Hdadi, K. 2000. Simulations des transformations du carbone et de l'azote au cours de la décomposition des résidus végétaux dans le sol en fonction de leur composition biochimique. Stage DEA Université P&M Curie, 50.
- Heinrich, D., & Hergt, M. 1993. Atlas de l'écologie. Encyclopédies d'aujourd'hui, Le Livre de Poche, La Pocothèque.
- Heller, R., Esnault, R., & Lance, C. 1998. *Physiologie végétale, tome 1 : Nutrition*. Paris : 6^{ème} édition del'abrégé, éd. Dunot.
- Holben, B., Kimes, D., & Fraser, R. S. 1986. Directional Reflectance Response In Avhrr Red And Near-Ir Bands For 3 Cover Types And Varying Atmospheric Conditions. *Remote Sensing* Of Environment, 19(3), 213.

- Houghton, R. A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. Tellus Series B-Chemical And Physical Meteorology, 55(2), 378.
- House, J. I., Prentice, I. C., & Ramankutty, N. et al. 2003. Reconciling apparent inconsistencies in estimates of terrestrial CO2 sources and sinks. *Tellus Series B, Chemical and Physical Meteorology*, 55, 345–363.
- IFEN. 2002. L'environnement en France. Edition La découverte.
- IMAGE. 2001. The IMAGE 2.2 Implementation of the SRES Scenarios : A Comprehensive Analysis of Emissions, Climate Change and Impacts in the 21st century. Tech. rept. National Institute for Public Health and the Environment, RIVM, Bilthoven, The Netherlands.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Ishida, A., Uemura, A., Koike, N., Matsumoto, Y., & Hoe, A. L. 1999. Interactive effects of leaf age and self-shading on leaf structure, photosynthetic capacity and chlorophyll fluorescence in the rain forest tree, Dryobalanops aromatica. *Tree Physiology*, **19**(11), 741.
- Janssens, I. A., Freibauer, A., Ciais, P., Smith, P., Nabuurs, G. J., 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 CO2 emissions. Science, 300(5625), 1538.
- Johnson, I. R., & Thornley, J. H. M. 1984. A Model of Instantaneous and Daily Canopy Photosynthesis. *Journal of Theoretical Biology*, **107**(4), 531–545.
- Jung, M., Henkel, K., Herold, M., & Churkina, G. 2006. Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling. *Remote Sensing Of Environment*, 101(4), 534.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin Of The American Meteorological Society, 77(3), 437-470.
- Kaminski, T., Rayner, P. J., Heimann, M., & Enting, I. G. 2001. On aggregation errors in atmospheric transport inversions. *Journal Of Geophysical Research-Atmospheres*, **106**(D5), 4703.
- Kiehl, J. T., & Trenberth, K. E. 1997. Earth's annual global mean energy budget. Bull. Amer. Meteor. Soc, 78(2), 197–208.
- Knyazikhin, Y., Kranigk, J., Myneni, R. B., Panfyorov, O., & Gravenhorst, G. 1998. Influence of small-scale structure on radiative transfer and photosynthesis in vegetation canopies. *Journal* Of Geophysical Research-Atmospheres, 103(D6), 6133.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., & Prentice, I. C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1), -.
- Krysanova, V., Hattermann, F., & Wechsung, F. 2005. Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrological Processes*, 19(3), 763–783.

- Kucharik, C. J., & Brye, K. R. 2003. Integrated biosphere simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. *Journal* of Environmental Quality, 32(1), 247–268.
- Leff, B., Ramankutty, N., & Foley, J. A. 2004. Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biogeochemical Cycles*, **18**(1), –.
- Leprieur, C., Verstraete, M. M., & Pinty, B. 1994. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data. *Remote Sensing Reviews*, 10, 265–284.
- Leuning, R. 2002. Temperature dependence of two parameters in a photosynthesis model. *Plant Cell and Environment*, **25**(9), 1205–1210.
- Lobell, D. B., & Asner, G. P. 2003. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields. Science, 299(5609), 1032–1032.
- Lobell, D. B., Bala, G., & Duffy, P. B. 2006. Biogeophysical impacts of cropland management changes on climate. *Geophysical Research Letters*, **33**(6).
- Maignan, F., Breon, F. M., & Lacaze, R. 2004. Bidirectional reflectance of Earth targets : Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the Hot Spot. *Remote Sensing Of Environment*, **90**(2), 210.
- Maignan, F., Breon, F. M., Bacour, C., Demarty, J., & Poirson, A. 2008. Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements - Comparison with in situ data and applications. *Remote Sensing Of Environment*, 112(2), 496.
- McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., & Freebairn, D. M. 1996. APSIM : A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. Agricultural Systems, 50(3), 255.
- Mccree, K. J. 1974. Changes in Stomatal Response Characteristics of Grain-Sorghum Produced by Water Stress during Growth. Crop Science, 14(2), 273–278.
- McGuire, A. D., Sitch, S., Clein, J. S., Dargaville, R., Esser, G., Foley, J., Heimann, M., Joos, F., Kaplan, J., Kicklighter, D. W., Meier, R. A., Melillo, J. M., Moore, B., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Reichenau, T., Schloss, A., Tian, H., Williams, L. J., & Wittenberg, U. 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century : Analyses of CO2, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(1), 183–206.
- Mcmurtrie, R. E., Benson, M. L., Linder, S., Running, S. W., Talsma, T., Crane, W. J. B., & Myers, B. J. 1990. Water Nutrient Interactions Affecting the Productivity of Stands of Pinus-Radiata. Forest Ecology and Management, 30(1-4), 415-423.
- McPherson, R. A., Stensrud, D. J., & Crawford, K. C. 2004. The Impact of Oklahoma's Winter Wheat Belt on the Mesoscale Environment. *Monthly Weather Review*, **132**(2), 405–421.
- Medlyn, B. E., Dreyer, E., Ellsworth, D., Forstreuter, M., Harley, P. C., Kirschbaum, M. U. F., Le Roux, X., Montpied, P., Strassemeyer, J., Walcroft, A., Wang, K., & Loustau, D. 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant Cell and Environment*, 25(9), 1167–1179.
- Monk, C. 1966. Ecological Importance Of Root/Shoot Ratios. Bulletin Of The Torrey Botanical Club, 93(6), 402.
- Monsi, M., & Saeki, T. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japanese Journal of Botany, 14, 22–52.

- Monteith, J. L. 1972. Solar-Radiation And Productivity In Tropical Ecosystems. Journal Of Applied Ecology, 9(3), 747.
- Monteith, J. L. 1977. Climate And Efficiency Of Crop Production In Britain. Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London Series B-Biological Sciences, 281(980), 277.
- Myneni, R. B., Nemani, R. R., & Running, S. W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 35(6), 1380.
- New, M., Hulme, M., & Jones, P. 2000. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II : Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal* Of Climate, 13(13), 2217.
- Nobre, C. A., Sellers, P. J., & Shukla, J. 1991. Amazonian Deforestation And Regional Climate Change. Journal Of Climate, 4(10), 957.
- Olioso, A., Inoue, Y., Wigneron, J. P., Ortega-Farias, O., Lecharpentier, P., Parde, M., Calvet, J. C., & Inizan, O. 2001. Using a coupled crop-SVAT model to assess crop canopy processes from remote sensing data. *IGARSS 2001*, -.
- 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. Proceedings of the First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing.
- Osborne, T. M., Lawrence, D. M., Challinor, A. J., Slingo, J. M., & Wheeler, T. R. 2007. Development and assessment of a coupled crop-climate model. *Global Change Biology*, 13(1), 169–183.
- Parton, W. J., Stewart, J. W. B., & Cole, C. V. 1988. Dynamics Of C, N, P And S In Grassland Soils - A Model. *Biogeochemistry*, 5(1), 109–131.
- Parton, W. J., Hartman, M., Ojima, D., & Schimel, D. 1998. DAYCENT and its land surface submodel : description and testing. Global and Planetary Change, 19(1-4), 35-48.
- Passioura, J. B. 1996. Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation*, **20**(2), 79.
- Pattey, E., Strachan, I. B., Boisvert, J. B., Desjardins, R. L., & McLaughlin, N. B. 2001. Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyperspectral reflectance measurements. Agricultural And Forest Meteorology, 108(2), 85.
- Peylin, P., Rayner, P. J., Bousquet, P., Carouge, C., Hourdin, F., Heinrich, P., Ciais, P., contributors, AEROCARB, &??? 2005. Daily CO2 flux estimates over Europe from continuous atmospheric measurements : 1, inverse methodology. Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 3173-3186.
- Piao, S. L., Friedlingstein, P., Ciais, P., Zhou, L. M., & Chen, A. P. 2006. Effect of climate and CO2 changes on the greening of the Northern Hemisphere over the past two decades. *Geophysical Research Letters*, 33(23), -.
- Pielke, R. A., Adegoke, J. O., Chase, T. N., Marshall, C. H., Matsui, T., & Niyogi, D. 2007. A new paradigm for assessing the role of agriculture in the climate system and in climate change. *Agricultural And Forest Meteorology*, 142(2-4), 234.
- Post, W. M., Emanuel, W. R., Zinke, P. J., & Stangenberger, A. G. 1982. Soil Carbon Pools And World Life Zones. *Nature*, 298(5870), 156.

- Prentice, I. C., Cramer, W., Harrison, S. P., Leemans, R., Monserud, R. A., & Solomon, A. M. 1992. A Global Biome Model Based On Plant Physiology And Dominance, Soil Properties And Climate. Journal Of Biogeography, 19(2), 117–134.
- Ramankutty, N., & Foley, J. A. 1999. Estimating historical changes in global land cover : Croplands from 1700 to 1992. Global Biogeochemical Cycles, 13(4), 997-1027.
- Ramankutty, N., Evan, A. T., Monfreda, C., & Foley, J. A. 2008. Farming the planet : 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, **22**(1).
- Randerson, J. T., Thompson, M. V., Conway, T. J., Fung, I. Y., & Field, C. B. 1997. The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(4), 535.
- Reich, P. B., Walters, M. B., & Ellsworth, D. S. 1992. Leaf Life-Span in Relation to Leaf, Plant, and Stand Characteristics among Diverse Ecosystems. *Ecological Monographs*, 62(3), 365–392.
- Reichstein, M., Ciais, P., Papale, D., Valentini, R., Running, S., Viovy, N., Cramer, W., Granier, A., Ogée, J., & Allard, V. 2007. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly : a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology*, 13(3), 634–651.
- Riou, R., & Seyler, F. 1995. The Effect Of Soil On Rain-Forest Canopy Nir Reflectance On Spot Oblique Imagery. Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Ii, 320(11), 1079.
- Ritchie, J. T., & Otter, S. 1985. Description and performance of CERES-Wheat : A user-oriented wheat yield model. ARS Wheat Yield Project, 38, 159–175.
- Robertson, G.W. 1983. Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crops, Technical Note No. 180. Tech. rept. WMO, Geneva.
- Ruimy, A., Dedieu, G., & Saugier, B. 1996. TURC : A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**(2), 269.
- Rödenbeck, C., Houweling, S., Gloor, M., & Heimann, M. 2003. Time-dependent atmospheric CO2 inversions based on interannually varying tracer transport. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 55(2), 488–497.
- Schimel, D. S., House, J. I., & Hibbard, K. A. et al. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414, 169–172.
- Schittenhelm, S. 1999. Agronomic performance of root chicory, Jerusalem artichoke, and sugarbeet in stress and nonstress environments. Crop Science, 39(6), 1815.
- Schlesinger, W. H. 1997. Biogeochemistry : An Analysis of Global Change, 2nd edn. San Diego : Academic Press.
- Scholze, M., Bondeau, A., Ewert, F., Kucharik, C., Priess, J., & Smith, P. 2005. Advances in Large-Scale Crop Modeling. Eos, Transactions American Geophysical Union, 86(26), 245-247.
- Schär, C., & Jendritzky, G. 2004. Climate change : Hot news from summer 2003. Nature, 432(7017), 559.
- Sellers, P. J., Mintz, Y., Sud, Y. C., & Dalcher, A. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. J. Atmos. Sci., 43, 505–531.
- Sellers, P. J., Dickinson, R. E., Randall, D. A., Betts, A. K., Hall, F. G., Berry, J. A., Collatz, G. J., Denning, A. S., Mooney, H. A., Nobre, C. A., Sato, N., Field, C. B., & HendersonSellers, A. 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, **275**(5299), 502–509.

- Sinclair, T. R., & Seligman, N. 2000. Criteria for publishing papers on crop modeling. Field Crops Research, 68(3), 165–172.
- Sinclair, T. R., & Seligman, N. G. 1996. Crop modeling : From infancy to maturity. Agronomy Journal, 88(5), 698.
- Singels, A., & Dejager, J. M. 1991. Determination Of Optimum Wheat Cultivar Characteristics Using A Growth-Model. Agricultural Systems, 37(1), 25.
- Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K., & S., Venevsky. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9(2), 161–185.
- Sitch, S., Brovkin, V., von Bloh, W., van Vuuren, D., Assessment, Bene, & Ganopolski, A. 2005. Impacts of future land cover changes on atmospheric CO2 and climate. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2).
- 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(5), 525.
- Smith, P., Milne, R., Powlson, D. S., Smith, J. U., Falloon, P., & Coleman, K. 2000b. Revised estimates of the carbon mitigation potential of UK agricultural land. Soil Use And Management, 16(4), 293.
- Smith, P. C., De Noblet-Ducoudré, N., Ciais, P., Peylin, P., Viovy, N., Bondeau, A., Meurdesoif, Y., & Seguin, B. soumis. European-wide simulations of present cropland phenology, productivity and carbon fluxes using an improved terrestrial ecosystem model. *Global Biogeochemical Cycles*.
- Spaeth, S. C., & Sinclair, T. R. 1985. Linear Increase In Soybean Harvest Index During Seed-Filling. Agronomy Journal, 77(2), 207.
- Stehfest, E., Heistermann, M., Priess, J. A., Ojima, D. S., & Alcamo, J. 2007. Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent. *Ecological Modelling*, 209(2-4), 203.
- Stockle, C. O. 1992. Canopy Photosynthesis And Transpiration Estimates Using Radiation Interception Models With Different Levels Of Detail. *Ecological Modelling*, 60(1), 31.
- Stockle, C. O., Martin, S. A., & Campbell, G. S. 1994. Cropsyst, A Cropping Systems Simulation-Model - Water Nitrogen Budgets And Crop Yield. Agricultural Systems, 46(3), 335.
- Stott, Peter A., Stone, D. A., & Allen, M. R. 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003. Nature, 432(7017), 610.
- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Sweeney, C., Poisson, A., Metzl, N., Tilbrook, B., Bates, N., Wanninkhof, R. H., Feely, R. A., Sabine, C., Olafsson, J., & Noriji, Y. 2002. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Res. II*, 49.
- Tans, P. P., Fung, I. Y., & Takahashi, T. 1990. Observational Constraints On The Global Atmospheric Co2 Budget. Science, 247(4949), 1431.
- Tarantola, A. 1987. Inverse problem theory. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier.
- Tsvetsinskaya, E. A., Mearns, L. O., & Easterling, W. E. 2001. Investigating the effect of seasonal plant growth and development in three-dimensional atmospheric simulations. Part I : Simulation of surface fluxes over the growing season. Journal Of Climate, 14(5), 692.

- US Department of Agriculture World Agricultural Outlook Board Joint Agricultural Weather Facility, Washington DC. 2007. Major world crop areas and climatic profiles. http://www.usda.gov/oce/weather/pubs/Other/MWCACP/index.htm.
- Van Der Werf, G. R., Randerson, J. T., Collatz, G. J., & Giglio, L. 2003. Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. *Global Change Biology*, 9(4), 547–562.
- Vandiepen, C. A., Wolf, J., Vankeulen, H., & Rappoldt, C. 1989. Wofost A Simulation-Model Of Crop Production. Soil Use And Management, 5(1), 16.
- Vetter, M., Churkina, G., Jung, M., Reichstein, M., Zaehle, S., Bondeau, A., Chen, Y., Ciais, P., Feser, F., & Freibauer, A. 2007. Analyzing the causes and spatial pattern of the European 2003 carbon flux anomaly in Europe using seven models. *Biogeosciences Discussions*, 4(2), 1201–1240.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. Science, 277(5325), 494.
- Vleeshouwers, L. M., & Verhagen, A. 2002. Carbon emission and sequestration by agricultural land use : a model study for Europe. *Global Change Biology*, 8(6), 519.
- Vuichard, N. 2005. Modélisation des flux de gaz à effet de serre des prairies européennes. Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- Vuichard, N., Ciais, P., Belelli Marchesini, L., Smith, P. C., & Valentini, R. en révisiona. Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in former USSR since 1990. Global Biogeochemical Cycles.
- Vuichard, N., Ciais, P., Belelli Marchesini, L., Smith, P. C., & Valentini, R. en révisionb. On the ability of the ORCHIDEE global vegetation model to simulate carbon and water fluxes of a Southern Siberian Steppe. Rangeland Ecology and Management.
- Warren-Wilson, J. 1972. Control of crop processes. Pages 7-30 of : Rees, A. R., Cockshull, K. E., Hand, D. W., & Hurd, R. G. (eds), Crop Processes in Controlled Environments. Academic Press, London.
- Weir, A. H., Bragg, P. L., Porter, J. R., & Rayner, J. H. 1984. A winter wheat crop stimulation model without water or nutrient limitations. *Journal of Agricultural Science*, **102**(2), 371–382.
- Whisler, F. D., Acock, B., Baker, D. N., Fye, R. E., Hodges, H. F., Lambert, J. R., Lemmon, H. E., McKinion, J. M., & Reddy, V. R. 1986. Crop Simulation-Models In Agronomic Systems. Advances In Agronomy, 40, 141.
- Williams, J. R., Jones, C. A., & Dyke, P. T. 1984. A Modeling Approach To Determining The Relationship Between Erosion And Soil Productivity. Transactions Of The Asae, 27(1), 129.
- Wilson, M. F., & Henderson-Sellers, A. 1985. A Global Archive Of Land Cover And Soils Data For Use In General-Circulation Climate Models. *Journal of Climatology*, 5(2), 119–143.
- Wullschleger, S. D. 1993. Biochemical Limitations to Carbon Assimilation in C(3) Plants a Retrospective Analysis of the a/Ci Curves from 109 Species. Journal of Experimental Botany, 44(262), 907–920.
- Zaehle, S., Bondeau, A., Carter, T. R., Cramer, W., Erhard, M., Prentice, I. C., Reginster, I., Rounsevell, M. D. A., Sitch, S., Smith, B., Smith, P. C., & Sykes, M. 2007. Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990-2100. *Ecosystems*, 10(3), 380.
- Zhou, L. M., Tucker, C. J., Kaufmann, R. K., Slayback, D., Shabanov, N. V., & Myneni, R. B. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. Journal Of Geophysical Research-Atmospheres, 106(D17), 20069–20083.

Liste des acronymes

aGCM	atmospheric General Circulation Model
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CLM	Community Land Model
CORINE	COoRdination de l'INformation sur l'Environnement
CRU	Climate Research Unit
DVI	Difference Vegetation Index
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
faPAR	absorbed fraction of Photosynthetically Active Radiation
GES	Gaz à Effet de Serre
GICC	Gestion et Impacts du Changement Climatique
GIMMS	Global Inventory
GPP	Gross Primary Productivity
HANPP	Human Appropriation of NPP
HI	Harvest Index
IBIS	Integrated BIosphere Simulator
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
ISBA	Interactions entre le Sol la Biosphère et l'Atmosphère
JRC	Joint Research Centre
LAI	Leaf Area Index
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
LPJmL	Lund-Potsdam-Jena managed Land
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement.
MARS	Monitoring Agriculture from Remote-Sensing
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectrometer
MVC	Maximum Value Composite
NBP	Net Biome Production
NCC	NCEP Corrected by CRU
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NEE	Net Ecosystem Exchange
NEP	Net Ecosystem Productivity
NERC	U.K. Natural Environment Research Council
NPP	Net Primary Productivity
NUTS	Nomenclature commune des Unités Territoriales Statistiques
ORCHIDEE	ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms

PaSim	Pasture Simulation Model
PELCOM	Pan-European Land Use and Land Cover Monitoring
\mathbf{PFT}	Plant Functional Type
PIK	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
POLDER	POlarization and Directionality of the Earth's Reflectances
QUEST	Quantifying and Understanding the Earth SysTem
R_a	Respiration autotrophe
\mathbf{R}_h	Respiration hétérotrophe
RUE	Radiation Use Efficiency
SARRA	Système d'Analyse Régionale des Risques Agro-climatiques
SECHIBA	Schématisation des EChanges Hydriques à l'Interface entre la Biosphère et l'Atmophère
SLA	Specific Leaf Area
SPOT	Systeme Pour l'Observation de la Terre
STICS	Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard
STOMATE	Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems
SVAT	Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer scheme
SWAT	Soil Water Assessment Tool
SWIM	Soil Water Integrated Management
WOFOST	WOrld center for FOod Study Together
WUE	Water Use Efficiency