

**PROGRAMME FEDERATEUR « AGRICULTURE ET DEVELOPPEMENT DURABLE »
Appel à propositions de recherche 2006**

Décembre 2006

1- FICHE D'IDENTITE DU PROJET**Titre du projet**

Aménager l'Utilisation des Terres et des Ressources de l'Environnement en Modélisant les Ecosystèmes
aNTropiques

Acronyme

AUTREMENT

Résumé court

L'objectif de ce projet est double : 1) **anticiper sur la réponse des écosystèmes** anthropiques à l'évolution climatique aux échelles saisonnière (prévision) et séculaire (changement climatique futur) ; 2) **proposer des réallocations possibles des surfaces utilisées par l'Homme**, en fonction de scénarios climatiques disponibles pour le climat du 21^{ème} siècle permettant de garantir la sécurité des productions, l'utilisation des ressources, et une adaptation à coût minimal.

Responsable du projet

Civilité (M, Mme, Mlle)	M	Titre	Docteur	Nom	Viovy	Prénom	Nicolas
Adresse électronique	Nicolas.viovy@cea.fr		Tel	01 69 08 77 17		Fax	01 69 08 30 73
Établissement	UMR CNRS/CEA/UVSQ						
Unité (nom complet)	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement						
Département							
N° d'unité	UMR						
Directeur d'unité	Robert Vautard						
Adresse	LSCE, Bat 712, Case courrier 132, Orme des merisiers						
Code Postal	91191		Ville	Gif sur Yvette			

Ce projet fait-il partie des projets labellisés (ou en cours de labellisation) par un pôle de compétitivité (ou par plusieurs, en cas de projet interpôle) ?

Oui [] Non [X]

Si oui, nom du pôle ou des pôles :

Axe(s) thématique(s)¹ auquel le projet se rattache :

Thématique 1	3.4. Changement climatique et agriculture
Eventuellement Thématique 2	3.2. De la préservation à l'amélioration des ressources naturelles par l'agriculture
Eventuellement Thématique 3	3.6. Les interactions entre les agricultures, du local au global

Principales disciplines associées au projet :

Discipline 1	Ecophysiologie, hydrologie, biophysique
Discipline 2	Economie
Discipline 3	Agronomie

Mots clés libres associés au projet (5 maximum)

Français	Modélisation de la biosphère, interactions surface-atmosphère, couplage économie-climat, hydrologie/irrigation, modélisation des agro-systèmes
Anglais	Biosphere modeling, surface-atmosphere interactions, coupling economy to climate, hydrology/irrigation, agro-systems modeling

¹ Cf. « Les thématiques de recherche », partie 3 de l'appel 2006

PADD 2006 – Projet AUTREMENT

Equipes de recherche participantes (équipe 1 = équipe du responsable du projet) :

Equipe n°	Nom du correspondant principal	Prénom	Titre ou grade + organisme employeur	Discipline	Etablissement	Département de recherche (le cas échéant)	Unité	Nom et Prénom du Directeur de l'unité
1	Viovy	Nicolas	Dr/CEA	Modélisation des cycles biogéochimiques	UMR CEA/CNRS/UVSQ		LSCE	Robert Vautard
2	Gitz	Vincent	Dr/CIRAD	Sciences. Economiques	UMR CIRAD	TERA	CIREN	Jean -Charles Hourcade
3	Sultan	Benjamin	CR/IRD	Agronomie tropicale	UMR CNRS/IRD		LOCEAN	Laurence Aymard
4	Launay	Marie	IR/INRA	Agronomie tempérée	INRA	Environnement et Agronomie	AGROCLIM	Nadine Brisson
5	Soussana	Jean François	DR/INRA	Agronomie Prairies	INRA	EFPA	URAC	Jean François Soussana
6	Lousteau	Denis	DR/INRA	Sylviculture	INRA	EFPA	EPHYSE	Denis Lousteau

PADD 2006– Projet AUTREMENT

Durée du projet : 24 mois 36 mois

Nombre de personnes-mois² mobilisées pour toute la durée du projet :

Chercheurs et enseignants-chercheurs permanents	Post doctorants déjà recrutés	Doctorants déjà recrutés	Ingénieurs et techniciens permanents	Personnes à recruter
105	0	54	18	88

² Nombre de personnes x nombre total de mois de travail sur le projet.

2- RESUME DU PROJET

Les systèmes agricoles sont intimement liés au changement climatique. D'une part, ils seront affectés par ses différentes manifestations : dérive de l'état moyen de l'atmosphère et modification de sa variabilité. D'autre part, les espaces ruraux sont également des contributeurs nets au changement climatique par leur influence sur la composition chimique de l'atmosphère et sur les rayonnements solaires et telluriques. Les modes de gestion des agrosystèmes seront donc déterminants tant pour des questions d'adaptation au nouveau contexte climatique que de mitigation du changement climatique lui-même. Ce projet se propose d'étudier les deux volets de ces conditions de la soutenabilité de l'agriculture, en mettant l'accent sur la partie la moins connue, qui est celle de la vulnérabilité et des potentiels d'adaptation des agro-systèmes aux échelles continentales, saisonnières et séculaires.

Les principales questions qui sous-tendront nos travaux sont,

i) du côté de l'adaptation:

- Comment mesurer cette vulnérabilité pour l'agronomie, l'hydrologie et l'économie?
- Comment va évoluer cette vulnérabilité au cours du 21^{ème} siècle ? Nous quantifierons les impacts du changement climatique sur la productivité agricole, la disponibilité de certaines ressources (eau, azote) et les éventuels dommages engendrés dans le secteur économique agricole.
- Comment peut-on anticiper une éventuelle aggravation de cette vulnérabilité ? Nous proposerons des solutions d'adaptation sous forme de changement d'allocation des terres et/ou de gestion des ressources visant à limiter les dommages à la fois agronomiques, hydrologiques et économiques.

ii) Du côté de la mitigation:

- Comment quantifier la contribution de l'agriculture au bilan net des gaz à effet de serre (CO₂, N₂O et CH₄), pris en compte dans le cadre des traités internationaux de limitation des émissions de ces gaz?
- Les stratégies d'adaptation de la gestion des agro-systèmes sont-elles neutres vis à vis de la propre contribution du secteur au changement climatique?

Pour répondre à ces questions nous développerons dans ce projet des outils de modélisation climatique, agronomique et économique, qui nous permettront de tester des scénarios quantitatifs de réaction et d'adaptation des agro-systèmes à l'échelle continentale, au changement climatique moyen (échelle du siècle) et à sa variabilité (échelle de la saison). Nous évaluerons l'incertitude de chacun de ces outils de manière détaillée afin d'identifier les directions de recherche les plus pertinentes au regard des objectifs du projet.

Le projet AUTREMENT est structuré en trois volets. Le premier volet concerne le développement de la plateforme intégrée de modélisation. Différents types de modèles seront couplés et/ou améliorés : (i) des modèles « agronomiques » simulant trois grands types d'agro-systèmes : les cultures, les prairies fauchées ou pâturées et la sylviculture, (ii) un modèle mondial du fonctionnement de la biosphère terrestre comportant un modèle d'hydrologie dans lequel l'irrigation va être incluse, et enfin (iii) un modèle économique. Une partie des couplages entre modèles agronomiques et modèle de biosphère a déjà été réalisée et demande à être finalisée. Le couplage entre les modèles économique et biosphérique par contre, et l'incorporation d'un schéma d'irrigation réaliste, constituent l'originalité du travail restant à faire.

L'objectif du second volet du projet est d'évaluer si des prévisions saisonnières réalisées à l'échelle continentale par un modèle générique et simple, peuvent servir à une meilleure gestion des itinéraires techniques (dates de semis, besoins en irrigation et fertilisants).

Dans le troisième volet deux scénarios contrastés du changement climatique futur nous permettront de quantifier (i) la réponse du système agricole-sylvicole-prairial, (ii) les conséquences en termes de coût des différentes filières, et (iii) de proposer des trajectoires d'évolution des filières techniques et de l'utilisation des terres. En dernier lieu nous nous proposons de tester l'impact des réaménagements proposés, s'ils sont suffisamment importants, sur la trajectoire du changement climatique.

C'est un projet fortement pluridisciplinaire puisqu'il associe des équipes agronomiques, des sciences du climat, de l'hydrologie et de l'économie. L'intégration de l'ensemble de ces composantes est une des grandes forces du projet AUTREMENT ainsi qu'une approche qui se veut mondiale même si l'on se focalisera en priorité sur quelques régions cibles (Europe, Afrique de l'Ouest, Etats unis) qui sont les mieux contraintes.

Les principaux résultats attendus du projet sont la mise en place de la plateforme de modélisation intégrée, son évaluation quantitative et un ensemble de résultats préliminaires sur l'impact du changement climatique sur le système agricole (fonctionnement et économie), les ressources et des réaménagements possibles.

3- DESCRIPTION DU PROJET

A. *Problématique et objectifs scientifiques poursuivis ; indiquer notamment, en l'argumentant, le positionnement par rapport au développement durable et par rapport à l'appel 2006, tant en ce qui concerne « L'esprit des recherches attendues » que « Les thématiques de recherche »³.*

Les scénarios de changement climatique futur prédisent une modification substantielle du climat mondial, résultant d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, pouvant avoir un effet sur la productivité des écosystèmes naturels et anthropiques. Ces changements nécessiteront une adaptation des agro-systèmes à grande échelle. Dans ce contexte, l'enjeu du développement durable en agriculture est double : Il faut à la fois adapter l'agriculture aux nouvelles conditions climatiques afin de maintenir le revenu agricole et subvenir à la demande tout en minimisant l'impact sur l'environnement. Sur ce dernier point, les études de modélisation climatique de cette dernière décennie montrent que les transformations des surfaces continentales par l'Homme ont participé au changement climatique récent via 1) une perturbation des bilans d'énergie de surface, une modification des flux de chaleur et de vapeur d'eau échangés entre les surfaces continentales et l'atmosphère, 2) une participation importante à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. L'évolution des pratiques agricoles face au changement climatique pose en fait deux problèmes. Le premier concerne le changement de l'état moyen du climat qui nécessite une adaptation en profondeur mais relativement progressive des modes de gestion. La seconde, peut être encore plus problématique, concerne la variabilité climatique qui pourrait augmenter conduisant ainsi à une augmentation des événements extrêmes ce qui a été particulièrement mis en exergue récemment avec l'été 2003 (Ciais et al 2005). Là il s'agit de pouvoir anticiper de tels événements grâce aux outils de prévision saisonnière qui commencent à voir le jour et qui pourraient permettre d'adapter la gestion à court terme pour minimiser l'impact de tels événements. C'est pourquoi par la suite on s'intéressera à la fois au court et long terme.

Au jour d'aujourd'hui il n'existe aucun outil prédictif, à l'échelle mondiale, nous permettant de réaliser des scénarios combinant les effets du changement climatique sur la productivité agricole, prairiale et forestière, et sur les ressources naturelles, aux choix des acteurs économiques concernant la gestion des surfaces et les éventuelles politiques de taxation des émissions de GES.

L'objectif à terme de ce projet s'inscrit, en deux volets, dans cette problématique :

- **Anticiper sur la réponse des agro-systèmes** à l'évolution climatique aux échelles saisonnière (prévision) et séculaire (changement climatique futur). Cette réponse sera exprimée en termes de productivité, d'utilisation de certaines ressources (eau, fertilisants), de coût économique des productions, et d'émissions de gaz carbonique.
- **En conséquence, proposer des réaménagements (réallocations) possibles des surfaces utilisées par l'Homme**, en fonction de scénarios climatiques disponibles pour le climat du 21^{ème} siècle garantissant la sécurité des productions mondiales, assurant la soutenabilité de l'utilisation des ressources contrôlant la productivité (eau, azote), et permettant une adaptation à coût minimal aux impacts du changement climatique sur les activités agricoles et forestières.

On se propose pour cela de *développer et d'évaluer une plateforme de modélisation intégrée* incluant des modèles du champ de l'économie, de l'agronomie, des processus d'écosystèmes et du climat, pour permettre de simuler à large échelle la réponse des systèmes anthropiques aux conditions climatiques, et de calculer les conséquences de cette réponse sur l'économie agricole. En retour, ces outils serviront aussi à proposer, de façon exploratoire ou de façon à respecter certaines contraintes de viabilité économique et environnementale, des solutions de réaménagement des terres et des pratiques culturelles à l'échelle de quelques régions cibles.

Ce projet s'insère dans les priorités thématiques de l'appel d'offre ADD de la façon suivante:

- 1) Il est au centre du point 3.4 « changement climatique et agriculture » parce qu'il propose des outils qui permettent à la fois de répondre aux problèmes des stratégies d'adaptation et d'évaluation des « coûts environnementaux » par rapport aux politiques de prévention, en particulier par rapport à l'estimation des puits de carbone.
- 2) Il entre également (dans une optique de grande échelle) dans le point 3.2 « préservation des ressources ». Il s'agit des ressources en eau ou azote permettant le fonctionnement des agro-systèmes, mais aussi de la « ressource climatique » dans la mesure où la gestion agricole a un impact potentiel sur le changement climatique (bilans d'énergie et bilan bio-géo-chimique des GES). Nous répondrons ainsi partiellement aux objectifs de production et stockage de carbone dans l'écosystème (dans le cadre du protocole de Kyoto).
- 3) Les développements proposés aborderont les grandes échelles spatiales (échelles continentale (Europe) et mondiale) (point 2.3 de l'appel d'offre). Ce sont en effet ces échelles que l'on doit considérer si l'on veut tenter de minimiser, dans une approche intégrée, l'impact du changement climatique sur l'agriculture et la sylviculture

³ Cf parties 2 et 3 de l'appel 2006

(point 3.4 de l'AO). *Nous n'avons donc pas l'ambition de pouvoir proposer des outils permettant une adaptation de l'agriculture à l'échelle de l'exploitation ou d'une coopérative mais de proposer des outils d'aide à la décision au niveau des grands acteurs économiques.* L'utilisation de modèles de grande échelle basés sur des processus, qu'ils soient biosphériques ou économiques, nous permettra de mieux comparer l'évolution des productivités et autres ressources en différents points du globe, en différents pays, et de représenter de façon cohérente à l'échelle mondiale les principaux flux de produits agricoles et forestiers.

Par rapport à l'esprit attendu des recherches, une des innovations du projet est sa multidisciplinarité qui cherche à mettre en commun les connaissances et outils de modélisation de la communauté des climatologues, des agronomes et des économistes pour chercher à développer un outil intégré. Sur ce point, notre ambition à l'issue de ce projet n'est pas de fournir un outil « clef en main » mais bien d'être en position d'évaluer de façon critique un système de modélisation (possibilités mais également limites de celui-ci). Nous pourrions également séparer les contributions respectives de différents processus, des actions humaines et naturelles. L'outil de modélisation ne doit donc pas être vu comme une fin en soi mais un moyen d'améliorer la façon d'appréhender des processus de nature différente, du moment que ceux-ci opèrent de manière interdépendante. En particulier le couplage entre différents modèles économie /agronomie/écosystèmes/climat conduira à une nécessaire adaptation de la façon de représenter les processus et les échelles dans chaque modèle. La réflexion critique passera également par le souci, chaque fois que cela sera possible, de confronter le résultat des simulations à des données de validation afin d'évaluer le degré de réalisme des simulations et les incertitudes associées.

B. «Etat de l'art» du sujet et de la problématique abordés ; bibliographie ; apport des différentes disciplines au projet et contribution scientifique originale du projet ; réflexivité critique vis-à-vis des concepts, outils et méthodes utilisés

La modélisation est l'outil incontournable pour aborder les problèmes définis plus haut qui se posent à grande échelle. L'enjeu est de définir une représentation simplifiée mais cependant réaliste (i) du fonctionnement des principaux écosystèmes dans le monde, qu'ils soient naturels ou anthropiques, en relation avec le système climatique, les ressources, et les modes d'actions de l'Homme (systèmes agricoles et itinéraires techniques), (ii) de la distribution spatiotemporelle, tant des échanges que des réservoirs d'eau (cette distribution est encore assez mal connue et il n'existe pas d'observations exhaustives des bilans hydrologiques), et (iii) des mécanismes d'arbitrage au sein de l'économie agricole et forestière globalisée entre types de cultures et itinéraires techniques.

Il existe actuellement deux grandes familles de **modèles de la biosphère continentale** : a) d'une part ceux qui simulent le fonctionnement des écosystèmes à l'échelle mondiale, mais qui prennent en compte de façon très rudimentaire les zones anthropisées (cultures, prairies, forêts gérées), b) d'autre part les modèles agronomiques qui représentent différentes cultures de façon très réaliste mais qui ne sont souvent applicables qu'à l'échelle de la parcelle. En étroite collaboration avec l'INRA, le LSCE travaille depuis 5 ans à une meilleure représentation de ces écosystèmes dans le modèle mondial ORCHIDEE (Krinner et al. 2005). L'un des premiers objectifs de ce projet est la finalisation de ce travail. Scholze et al. (2005) dans un bref état de l'art des modèles existants pointe l'absence de modèles comportant l'ensemble de ces spécificités et fonctionnant à l'échelle mondiale.

Le seul modèle qui prenne en compte simultanément la dynamique des écosystèmes naturels et les cultures à l'échelle mondiale (Bondeau et al. soumis) ne peut pas être couplé à un modèle de circulation générale atmosphérique et ne permet donc pas d'évaluer les rétroactions potentielles des écosystèmes sur le climat. Une originalité de notre projet est que nous utiliserons rigoureusement la même version d'ORCHIDEE en mode 'impact' et en mode couplé à l'ensemble du système climatique.

Les **modèles hydrologiques** (composantes essentielles des modèles de biosphère) fournissent un lien entre les évaluations partielles de certaines variables du bilan et les quantités d'eau stockées dans les différents réservoirs. Un effort important, au début des années 1990 était de modéliser la transpiration des couverts végétaux. Le LMD s'est attaché depuis de nombreuses années à développer et valider l'un de ces modèles, SECHIBA (Ducoudré et al. 1993), qui a pu être testé dans de nombreuses situations au cours d'expériences internationales et dont les résultats d'évapotranspiration sont globalement fiables. SECHIBA est le socle sur lequel ORCHIDEE s'est développé. Il est important de noter que ces modèles n'étaient pas développés pour calculer les variations de ressources en eau mais la répartition des précipitations entre évapotranspiration et écoulement. Un modèle peut parfaitement être réaliste sur les échanges tout en faisant des erreurs importantes sur l'évolution lente des réserves d'eau. Les modèles actuels (Entin et al., 1999 ; Milly et al., 2002) varient beaucoup dans leur complexité. Ils représentent l'eau dans le sol à l'aide d'un certain nombre de couches (de Rosnay et al., 2002), mais distinguent rarement l'eau des zones insaturées de l'eau des nappes. L'infiltration est généralement calculée par la loi de Richards, mais le flux latéral est rarement pris en compte.

D'autre part, des modèles de routage ont été développés indépendamment des précédents (Ducharne et al., 2003). Utilisant les données de ruissellement et de drainage, ils calculent l'écoulement des rivières utilisant un réseau hydrographique qui sert simplement à définir un temps de résidence de cette eau, dans son trajet vers les océans. Ces développements sont d'un intérêt majeur car les débits des rivières sont bien mesurés et nous donnent une indication importante sur les équilibres hydrologiques sur de grandes régions.

Dans le cadre du projet Autrement, nous voulons développer un modèle réaliste des différents réservoirs de l'eau continentale : eau de surface (humidité des sols, lacs, marais, rivières) ; eaux souterraines. Nous voulons aussi représenter l'irrigation dans le modèle de climat. A l'heure actuelle, l'irrigation n'est représentée que par une humidification initiale des sols, et la réaction immédiate sur l'évaporation. Nous voulons introduire un cycle saisonnier, qui dépend du développement de la plante et de son besoin en eau. Nous nous appuyons sur un travail préliminaire effectué au LMD (de Rosnay et al, 2003). Nous utiliserons cette paramétrisation pour représenter l'irrigation des cultures, le devenir de cette eau irriguée et son effet sur les ressources en eau. Le fait de simuler à la fois le routage de l'eau et l'irrigation est fondamental puisque qu'il permet d'estimer la demande mais aussi la disponibilité. L'estimation de cette disponibilité (via les rivières notamment) nécessite une modélisation à grande échelle et ne peut se contenter d'une modélisation à l'échelle du paysage.

Pour ce qui est des **prévisions saisonnières**, les travaux récents du projet DEMETER ont mis en évidence dans plusieurs régions du globe l'intérêt d'une prévision probabiliste pour la prévision du rendement agricole (Cantelaube et Terres 2005, Marletto et al. 2005, Challinor et al. 2005). Challinor et al. (2005) ont montré notamment que l'utilisation de la moyenne des ensembles des prévisions de chaque modèle couplé océan-atmosphère améliorerait de façon significative la prévision du rendement de l'arachide en Inde par rapport à l'utilisation d'un seul modèle de prévision climatique. Cependant, le bénéfice de la prévision saisonnière pour l'agriculteur ne dépend pas uniquement de la qualité de la prévision climatique mais aussi du réel besoin de ce dernier de disposer de cette prévision et de sa stratégie d'adaptation face à un aléa climatique (Hansen 2002, Ingram et al. 2002). Une des innovations de ce projet est de tenter de fournir une évaluation détaillée du bénéfice de la prévision saisonnière non seulement en terme climatique (climat prévu vs climat observé) mais également en terme de bénéfice net pour l'agriculteur. Cette dernière évaluation passe par l'analyse détaillée des stratégies d'adaptation de l'agriculteur (utilisation de nouvelles variétés, augmentation de la densité de semis, utilisation d'intrants...) face à différents aléas climatiques. Chaque stratégie ayant un coût (prix des semences et des intrants, irrigation...), un gain en terme de rendement et un risque (mise en place d'une stratégie mal adaptée consécutive à une mauvaise prévision du climat), il est possible d'évaluer le bénéfice net de la prévision saisonnière pour les différents aléas climatiques de la période historique.

Les modèles de changement d'utilisation des terres ont l'ambition de rendre compte des déterminants anthropiques (notamment économiques) des dynamiques des usages des terres par l'homme, étant donné un contexte biogéophysique et des modèles de processus physiques. Ces modèles peuvent être de type très divers, en fonction (i) de leur échelle spatiale et temporelle, (ii) de leur périmètre spatial et temporel, et (iii) du type de représentation des comportements anthropiques. A l'heure actuelle, les modèles de changement d'utilisation des terres ont

- soit une composante spatiale forte permettant une bonne interaction avec les modèles de biosphère (comme le modèle IMAGE, Alcamo et al. 2002), mais leur mécanisme d'allocation de terre ne comporte alors pas de fondement économique stricto-sensu (non représentation des prix des biens agricoles et donc inexistence de mécanisme de marchés et de rétroactions entre économie et agronomie).
- soit un haut niveau de détail des déterminants économiques des secteurs agricoles et un couplage plus ou moins explicite avec des modèles agronomiques, mais avec l'adoption d'un périmètre uniquement régional (Adams et al, 1996; Schneider et al, 2006, Heckeley et Britz, 2001; De Cara et al, 2005; Sands et Leimbach, 2003, Sands et Edmonds, 2005; Godard et al, 2005), ce qui pose le problème du caractère ad-hoc des flux de bien et de valeurs à la frontière de la région (import export des produits agricoles, prix mondiaux des biens etc.), et qui limite la portée de ces modèles à répondre à la question de l'adaptation de l'agriculture mondiale au contexte du changement global.

Se pose donc le problème de la construction de modèles couplés fonctionnant sur un périmètre mondial, et à des échelles permettant l'incorporation de données soit spatialisées (données bio-géo-physiques) soit régionalisées (cas général des données économiques). Ce projet a l'ambition de faire un pas vers un exercice de ce type à l'échelle mondiale par le biais d'une spatialisation du modèle mondial et régionalisé Nexus-Land-Use (Gitz et al., 2006) conçu pour fonctionner de façon couplée avec le modèle de croissance économique récursif Imaclim-R développé au CIRED) et d'un couplage avec les modèles STICS et ORCHIDEE.

Le *développement raisonné de chacune de ces grandes familles de modèles (climat, hydrologie, écosystèmes et agronomie d'une part, économie de l'autre)*, en vue de leur *couplage, nécessitant de rassembler les communautés climat-biosphère, agriculture/sylviculture et économie, constitue la principale originalité de ce projet*. L'échelle de la première application est celle de la prévision saisonnière. Il s'agit de *mettre en place un mécanisme d'alerte précoce* afin d'informer avec les meilleures bases scientifiques possibles les acteurs de la productivité. L'échelle de la deuxième application est celle de la fin de ce siècle et de l'aide à la décision quant à l'usage qui sera fait des terres à l'échelle mondiale.

Le projet AUTREMENT se situe dans la continuité des actions menées à l'INRA par la MICCES. Le développement d'une plateforme couplant modèle agronomique, biosphérique et économique, à l'échelle mondiale participe à plusieurs enjeux scientifiques majeurs mis en avant dans le rapport de l'INRA sur le développement durable (Boiffin et al.) : a) un effort important de coopération entre sciences sociales et disciplines biotechniques, b) la prise en compte à la fois du court et du long terme, c) un souci d'anticipation pouvant permettre un meilleur usage, une meilleure gestion des ressources, d) la nécessité d'une approche supra-nationale permettant une comparaison entre la situation française et celle d'autres pays en particulier européens.

Le développement de la composante hydrologique et de la représentation de l'irrigation, dans un modèle climatique (une première internationale), permettra d'évaluer le devenir de l'eau irriguée (répartition entre évapotranspiration et écoulement) ; quantifier son recyclage (important probablement dans les zones humides mais faibles dans les zones plus arides) ; et déterminer l'influence de l'irrigation sur les ressources en eau. Réciproquement, on s'attachera à comprendre dans quelle mesure les ressources en eau permettent de satisfaire les besoins en irrigation. Il faut noter que ce travail permettra dans le futur d'aborder la question de l'importance respective de l'augmentation du CO₂ et du changement de l'utilisation des sols sur les ressources.

Le projet AUTREMENT cherche à améliorer la compréhension du rôle des cultures, des prairies et des forêts gérées en termes de bilan des gaz à effet de serre aux niveaux Européen et mondial. L'Union Européenne et la France ont ratifié le protocole de Kyoto, et ont été à la pointe des négociations pour préserver l'intégrité environnementale des dispositions prises au sein de l'UNFCCC pour son implémentation. Le projet apportera des diagnostics quantitatifs des bilans de gaz à effet de serre de ces surfaces, incluant leurs modes de gestion et les impacts du climat. Les résultats attendus permettront de séparer les effets naturels de ceux de la gestion durant la première période de vérification du Protocole (2008-2012). Les compromis entre gains de productivité, émissions de gaz à effet de serre et séquestration du carbone dans les sols cultivés pourront être évalués de manière quantitative pour le présent et sous différents scénarios futurs.

Enfin, le projet compte apporter un début de réponse à la question de l'adaptation « optimale », i.e. « à moindre coût », du système agricole mondialisé aux contraintes posées par le changement climatique, la modification des disponibilités en ressources, et l'évolution des besoins alimentaires et non-alimentaires (bio-énergie, bio-matériaux). En adoptant la perspective du « planificateur bienveillant », nous analyserons quels pourraient être les différents arbitrages de productions et de consommation mettant en balance, dans un calcul coût-bénéfice, un ensemble de critères de soutenabilité: (i) du côté des producteurs: la valorisation potentielle des biens alimentaires et non alimentaires par le marché *versus* les risques pesant sur les capacités de production, (ii) du côté des consommateurs: la satisfaction de besoins élémentaires incompressibles en alimentation *versus* une certaine flexibilité des diètes et l'apparition de besoins non alimentaires (bio-énergie, bio-matériaux), et (iii) du côté environnemental, la préservation des ressources bio-géo-chimiques nécessaires à la production *versus* leur utilisation plus ou moins intensive pour la production.

Il est bien évident que les résultats attendus d'un tel projet ne représentent qu'une première étape pour aborder les grandes questions liées au développement durable en agriculture énoncées précédemment. Il s'agit avant tout d'un travail exploratoire qui permettra de tester un ensemble d'hypothèse avec une représentation très simple des agro-systèmes, notamment par un nombre limité de cultures et d'itinéraires techniques qui seront représentés. De même si notre objectif est bien d'aborder l'échelle mondiale, nous nous focaliserons en premier lieu sur L'Europe et l'Afrique de l'Ouest et dans une certaine mesure sur les Etats unis.

D. Description du projet : étapes, méthodologie, outils, données, terrains...

Le socle de ce projet est le développement d'une plateforme de modélisation intégrée qui permette a) de simuler la réponse de certains écosystèmes anthropiques et de certains indicateurs économiques à des changements de conditions climatiques, b) d'envisager la rétroaction sur le système climatique d'une adaptation de cette réponse. Elle repose sur la nécessité de coupler trois types de modèles : des modèles 'agronomiques' spécifiques à chaque secteur, un modèle biosphérique générique et un modèle économique. Ce que l'on attend d'une telle plateforme est de pouvoir à la fois estimer l'impact d'un changement climatique en termes de production et d'usage des ressources mais également de coût économique. A partir de ces informations il est alors possible d'estimer un réaménagement des terres et des pratiques culturelles qui permette d'optimiser un ensemble de critères (e.g. bénéfique, impact sur le bilan des GES etc..)

Une partie de ce travail de modélisation a déjà été réalisé en ce qui concerne le couplage entre modèles 'agronomiques' et modèle de biosphère. Ce qui en revanche représente un axe totalement nouveau est le couplage à un modèle économique. La première partie du projet (WP-1) sera donc essentiellement consacrée au développement du modèle intégré. Les seconde (WP-2) et troisième (WP-3) parties seront consacrées à l'application de cet outil à des situations spécifiques

Le tableau 2 dans la partie E résume les objectifs et les attendus ('deliverables') des différents volets (WP), ainsi que le niveau d'implication de chaque équipe à ces volets.

WP-1. Une meilleure prise en compte des actions de l’Homme sur le paysage dans les modèles biosphérique/hydrologique (ORCHIDEE) et économique (NEXUS)

L’objectif de ce volet est le développement des différents modèles (WP-1.1, WP-1.2, WP-1.3) qui seront utilisés pour la prévision saisonnière (WP-2) et séculaire (WP-3), et leur couplage (WP-1.4).

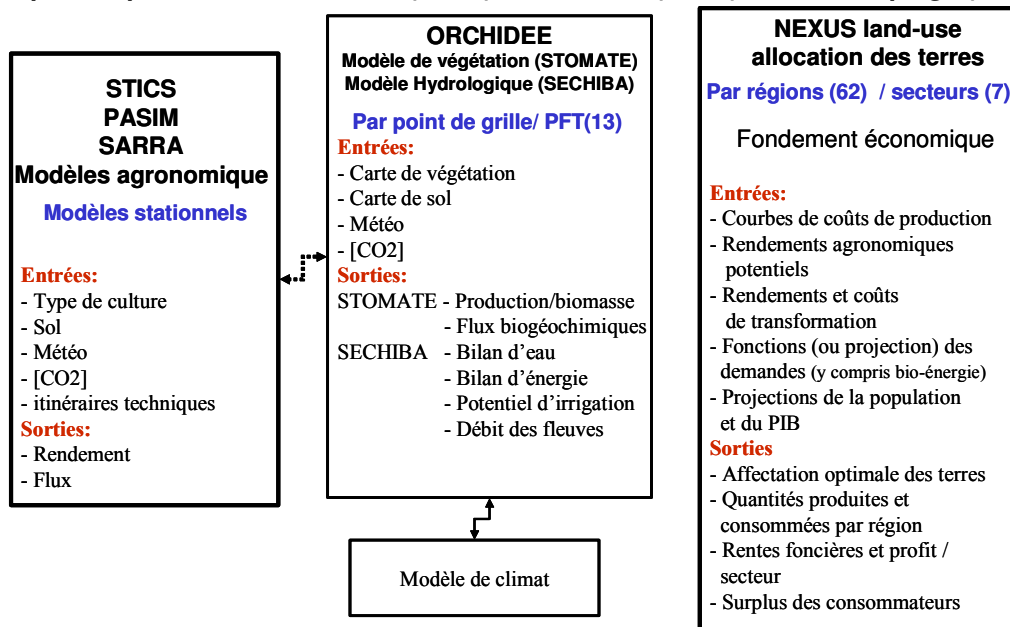


Figure 1 : Les différents modèles existants avec leurs principaux paramètres d’entrée et de sortie. Les flèches indiquent les couplages déjà existant ou en cours (pointillés)

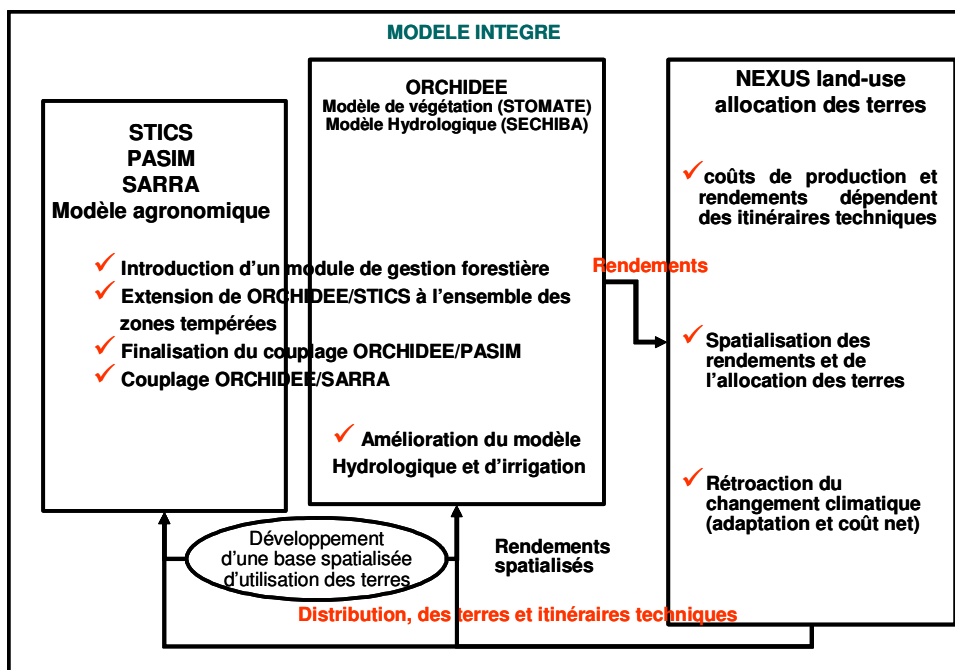


Figure 2 : Schématisation des couplages et développements prévus dans le cadre du projet.

Les deux figures ci-dessus résument les différents modèles existants avec leurs entrées et sorties et ce qu’il est prévu de développer dans le cadre de ce projet. Ces différents points sont détaillés par la suite.

WP-1.1. amélioration / développement du fonctionnement des écosystèmes anthropiques

ORCHIDEE (Krinner et al. 2005) est un modèle qui permet de simuler les cycles du carbone et de l'eau, le bilan d'énergie à l'interface sol/végétation/atmosphère. Il inclut l'ensemble des grands écosystèmes terrestres qui sont représentés sous forme de 12 types fonctionnels de plantes (PFTs). Ce modèle permet de fonctionner sur une grille bidimensionnelle de points. Chaque point est une mosaïque de végétation. ORCHIDEE peut être soit forcé par des données météorologiques externes, soit être couplé au modèle de climat de l'IPSL (IPSL-CM4), l'un des modèles ayant participé aux simulations climatiques réalisées dans le cadre du prochain rapport du GIEC. Cependant, dans sa version standard ORCHIDEE ne représente que les écosystèmes « naturels » et ne permet donc pas de représenter correctement les systèmes agricoles. C'est pourquoi un important travail entamé depuis 5 ans vise à intégrer de façon réaliste la représentation des écosystèmes anthropiques. Les trois principaux écosystèmes sur lesquelles l'homme intervient de façon significative, et dont nous avons choisi d'améliorer la représentation dans ORCHIDEE sont les cultures, les prairies et les forêts. Les cultures céréalières tempérées européennes ont été prises en compte dans ORCHIDEE par le couplage de notre modèle avec le modèle agronomique STICS (Brisson et al. 1998, 2000) de l'INRA d'Avignon et dans le cadre de travaux de thèse en cours (Gervois et al. 2004, de Noblet-Ducoudré et al. 2004). Dans ce couplage STICS pilote la phénologie des cultures alors que les processus comme la photosynthèse ou la respiration (plante et sol) est calculée par ORCHIDEE. Nous avons pu grâce à cette approche réaliser des cartographies de rendements et de flux net de carbone sur l'ensemble de l'Europe sur les 40 dernières années (Smith et al. en préparation).

Nous nous proposons, dans le cadre de ce projet, d'étendre notre couplage à l'ensemble des écosystèmes tempérés en prenant en compte la spécificité des différentes variétés et itinéraires techniques utilisés en Eurasie et en Amérique. Nous concentrerons nos travaux sur les 3 cultures clés sur lesquelles nous travaillons déjà (le blé, le maïs et le soja).

Pour les cultures tropicales (plus particulièrement le mil) nous nous baserons sur les travaux réalisés au CIRAD autour du modèle SARRA (Baron et al. 2005, Sultan et al. 2005). L'approche que nous utiliserons reste à définir. Nous pouvons d'une part inclure dans STICS les spécificités du modèle SARRA afin de bénéficier de la plateforme de couplage ORCHIDEE-STICS déjà élaborée, soit inclure une paramétrisation de ces cultures directement dans ORCHIDEE (actuellement en cours dans le cadre d'un stage de Master 2)

Pour les prairies nous utiliserons le modèle PASIM, en collaboration avec l'INRA de Clermont-Ferrand, Ce dernier permet de simuler le fonctionnement des prairies fauchées et pâturées en incluant l'impact des ruminants dans le système prairial. Il permet de simuler divers flux (CO_2 , N_2O et CH_4). Un important travail a déjà été réalisé dans le cadre d'une thèse pour rendre ce modèle générique et donc applicable à grande échelle. Plusieurs applications à l'échelle de l'Europe ont pu être réalisées (Vuichard et al. en révision). Il reste maintenant à incorporer cet écosystème et ses paramétrisations dans ORCHIDEE, et à étendre ces représentations aux latitudes tropicales.

Pour les forêts, comme pour les cultures tropicales, le travail reste à faire. Nous allons inclure dans ORCHIDEE les phases successives d'éclaircies et les rotations forestières ainsi que le devenir de la biomasse ainsi prélevée. Pour ce faire nous nous baserons sur le travail de S. Zaehle qui est actuellement en post-doctorat au LSCE et a développé un tel module dans le modèle LPJ (Zaehle et al, soumis).

WP-1.2. Amélioration du schéma d'hydrologie et prise en compte de l'irrigation

Un modèle hydrologique à plusieurs couches a été développé au LMD (de Rosnay et al, 2003). Ce modèle comporte plusieurs paramètres (conductivité hydraulique...) dont les valeurs sont uniformes. Or ces paramètres doivent être quantifiés en fonction du type de sol et de la région étudiée, et un certain nombre d'observations in situ (Entin et al., 1999 ; Robock, 2003) doivent nous permettre d'ajuster ces paramètres : ce sera la première tâche à mener à bien.

Il faudra ensuite ajouter à ce modèle, la représentation de l'eau souterraine et des écoulements latéraux (fleuves et écoulement souterrain). On introduira un schéma simpliste de ces mécanismes que nous chercherons par la suite à améliorer car il présente de nombreux défauts et inexactitudes. Il faut ajuster les temps de résidence de l'eau en fonction des bassins versants (dimensions, pentes...) et mieux distinguer l'écoulement de surface de l'écoulement souterrain.

Enfin, nous introduirons une paramétrisation de l'irrigation, basée sur le modèle STICS mais qui fera intervenir le cycle de l'irrigation en fonction du développement des cultures et du stress hydrique : l'introduction d'un tel modèle dans un modèle de climat est, à notre connaissance, une première internationale.

Ceci nous permettra :

- d'étudier le rôle de l'irrigation sur les réservoirs et ressources en eau ;
- la rétroaction de l'irrigation sur le climat : effet sur la température, et l'évapotranspiration ; mais aussi l'influence de l'évapotranspiration sur les pluies et la quantification du recyclage de cette eau, qui dépendra de la zone climatique étudiée,

Au final il sera possible de calculer les débits de rivières et le transfert d'eau souterraine.

WP-1.3. Adaptation du modèle économique

NEXUS-Land-use (Gitz et al, 2006) est un modèle économique sectoriel régionalisé traitant des secteurs agricoles et forestiers et de la répartition des terres à l'échelle mondiale (dans sa version actuelle 12 types de cultures dans 62 régions). C'est un modèle actuellement en développement au CIRED qui utilise comme données d'entrée des

données économiques régionales pour l'agriculture (coût de production, coût de transformation des produits, ...), des données agronomiques et physiques (rendements potentiels, itinéraires techniques). Il fournit en sortie une distribution des usages anthropiques, après maximisation du surplus du producteur ou éventuellement du surplus social, ou en utilisant des mécanismes alternatifs basés sur des inerties, la sécurité alimentaire.

Dans le cadre de ce projet, il s'agira de caler Nexus-Land-use sur les rendements agricoles donnés par la version anthropique d'ORCHIDEE (WP-1.1). Ce travail doit se faire au niveau mondial mais la priorité sera mise sur les régions européennes. Ceci nécessitera de transformer la description des rendements agricoles dans Nexus en passant d'une base régionalisée (version actuelle) à une base spatialisée par point de grille (version qui sera développée dans ce projet).

Plusieurs méthodes de couplage entre les deux modèles seront testées dans le cadre de l'application aux scénarios futurs dans ce projet:

- *mode lecture* : par prescription, à l'entrée de NEXUS-Land-use, d'un scénario temporel d'évolution des rendements agricoles sur le siècle.
- *mode couplé* : par itérations inter-périodes entre NEXUS-Land-use et la plateforme ORCHIDEE-STICS

WP-1.4. Couplage économie-agriculture

Le couplage économie-agriculture se fera via une plateforme d'échange entre les modèles ORCHIDEE et NEXUS, d'une façon similaire à ce qui est en cours à l'échelle de l'Europe entre les modèles ORCHIDEE et AROPAJ (projet GICC-2002 de P.-A. Jayet). La mise au point de cette plateforme nécessite l'identification des données à transmettre d'un modèle à l'autre, ainsi que la spatialisation (définition de cartes régionalisées) de données d'itinéraires techniques nécessaires aux 2 modèles.

Il est important ici de définir ce que l'on entend par itinéraires techniques. A l'instar des types fonctionnels de plantes qui sont utilisés dans les modèles de végétation, il s'agira de définir des types fonctionnels d'itinéraires. C'est à dire que pour chaque région on appliquera un itinéraire modèle censé représenter la gestion majoritairement utilisée pour la zone considérée. Eventuellement on définira un ensemble restreint de gestions qui sont appliquées pour des conditions climatiques contrastées (par exemple mousson forte ou faible en Afrique). La notion d'itinéraire ici représente un ensemble de paramètres qui sont utilisés en entrée du modèle. Le tableau ci-dessous décrit les principaux paramètres techniques qui servent en entrée du modèle. Ces paramètres techniques peuvent être prescrits ou bien calculés pour maximiser la productivité simulée pour des conditions climatiques données. Le modèle est donc capable d'estimer l'itinéraire optimum en cas de changement climatique. Mais ceci permet également de pallier à un manque de données sur les itinéraires appliqués pour une région donnée (en faisant l'hypothèse forte) que la productivité est toujours maximisée). On peut également utiliser une approche hybride c'est à dire forcer certains paramètres que l'on connaît et laisser le modèle calculer les autres.

agro-système	Paramètre technique
Culture	Date de semis, variété, quantité de fertilisant et date d'application, type (organique/minéral), flux et période d'irrigation, intensité du labour
Prairie	Dates de fauche, chargement animal instantané (période et durée), type d'animaux (équivalent UGB), quantité et date d'application de fertilisants, type (organique/minéral)
Forêt	Fréquence et intensité des éclaircies, durée de rotation

Table 1 : principaux paramètres des itinéraires techniques utilisés pour forcer le modèle par type d'agro-système.

Il va être également nécessaire de récolter un ensemble d'informations, si possible régionalement, de coûts liés aux paramètres cultureux et aux itinéraires techniques décrits précédemment, ainsi que d'informations sur la réaction de la demande des produits agricoles considérés (élasticités-prix et revenus pour les différents biens).

L'attendu essentiel de ce premier volet du projet est donc la disponibilité opérationnelle des différents modèles.

WP-2. Analyse saisonnière

L'objectif de ce deuxième volet du projet est d'évaluer si des prévisions saisonnières réalisées à l'échelle continentale par un modèle générique et simple, peuvent servir à une meilleure gestion des itinéraires techniques (dates de semis, besoins en irrigation et fertilisants).

WP-2.1. Développement d'une plateforme de prévision saisonnière mondiale

Afin d'initier le suivi en temps réel de l'évolution de la biosphère terrestre avec ORCHIDEE le LSCE a mis au point une chaîne de traitement automatique qui, chaque jour, (i) récupère les champs météorologiques extraits des prévisions opérationnelles du Centre européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT/ECMWF, Reading, GB), (ii) fait tourner le modèle ORCHIDEE sur la journée et (iii) donne accès via la

toile (<http://www-lsceorchidee.cea.fr>) à plusieurs variables simulées comme la productivité de la végétation, l'état hydrique des sols et les différents flux d'échange entre biosphère et atmosphère. Ce traitement utilise pour l'instant la version standard d'ORCHIDEE sans représentation réaliste des cultures. Une première étape du travail proposé consistera donc à utiliser la version « anthropique » d'ORCHIDEE.

Par ailleurs, le CEPMMT fournit des prévisions saisonnières pour l'océan et l'atmosphère à l'échelle de six mois. À cette échance, la prévisibilité du temps est très limitée et une approche probabiliste, par simulation d'ensemble est utilisée. Un ensemble de prévisions explore les états possibles de l'atmosphère avec une fréquence équivalente à leur vraisemblance. Ces ensembles de prévisions atmosphériques permettent de générer des ensembles de prévisions de l'état de la biosphère avec ORCHIDEE. Nous proposons d'évaluer cette approche. Pour cela nous nous appuyerons sur une base de données de 44 ans (1958-2001) de prévisions saisonnières mondiales. Ces prévisions de six mois débutent au premier jour des mois de février, mai, août, et novembre de chaque année. Leur état initial est dérivé de la ré-analyse ERA-40 du CEPMMT. Ces simulations ont été réalisées dans le cadre du projet européen DEMETER (5e PCRD). Nous compléterons cette base de données de plusieurs milliers de simulations avec celles correspondantes d'ORCHIDEE. Si l'avancement du projet le permet, nous étudierons la possibilité de désagréger les simulations sur la France pour augmenter leur résolution de 210km dans DEMETER à 40km. Pour cela nous étudierons les statistiques des différences entre les simulations du CEPMMT aux résolutions correspondantes.

WP-2.2. Validation des prévisions saisonnières et de la simulation du modèle intégré sur la période historique

Une première simulation sera réalisée sur la période historique (1958-2001) en utilisant les ré-analyses ERA-40. Elle servira de référence par la suite non seulement pour évaluer les prévisions saisonnières du WP-2 mais également pour comparer la situation actuelle à celle simulée pour le climat futur dans le WP-3. Cette simulation nous permettra également d'évaluer le réalisme des paramètres simulés par le modèle issu du WP1 en les comparant à la réalité (statistique FAO, données satellites etc...). Un ensemble de simulations sera ensuite réalisé à partir des prévisions saisonnières. La fiabilité et la résolution des prévisions seront quantifiées par les notations utilisées dans le domaine des prévisions saisonnières. Notons que l'habileté (skill) de ces prévisions ne reposera pas uniquement sur celle des prévisions atmosphériques, qui est faible est dehors des tropiques. Elle dépendra fortement de la qualité de l'état initial des plantes et des réserves hydriques du sol, qui est par définition mieux connu car il se réfère au passé plutôt qu'à l'avenir. La deuxième phase de l'évaluation des prévisions saisonnières d'ORCHIDEE focalisera sur leur capacité à discriminer des itinéraires techniques agricoles différents, l'objectif à terme des prévisions saisonnières étant de pouvoir changer l'itinéraire technique prévu initialement pour minimiser le dommage. En comparant l'erreur du système estimée précédemment avec la dispersion des réponses d'ORCHIDEE à des modifications des itinéraires techniques, nous établirons si de telles prévisions peuvent utilement aider à la décision. Si tel est le cas nous établirons un ensemble d'itinéraires techniques types pour différents cas où la prévision s'écarte fortement de la normale (e.g prévision d'une sécheresse ou d'un été pluvieux). L'apport économique de l'utilisation des prévisions sera évalué. Si effectivement l'intérêt des prévisions saisonnières de l'état de la biosphère est démontré, la chaîne de traitement décrite plus haut pourra les mettre en oeuvre de manière opérationnelle.

WP-2.3. Quantifier le bénéfice généré par l'utilisation de la prévision saisonnière

L'utilisation des prévisions saisonnières a pour objectif de pouvoir adapter l'itinéraire technique en fonction de la connaissance de l'état climatique attendu. L'objectif sera ici, grâce à la connaissance du climat à venir et ses conséquences sur les rendements de chercher l'itinéraire qui permettra d'optimiser le rendement. On évaluera alors soit le bénéfice en terme économique si le climat prédit se réalise, soit à l'inverse la perte si la prévision est fautive. A partir de l'étude de fiabilité de la prévision réalisée dans le WP 2.2, il sera alors possible d'estimer l'espérance de gain d'utilisation de la prévision et ceux pour différentes conditions climatiques. On se focalisera sur 2 régions-cibles à agriculture et sensibilité au climat contrastées : l'Europe et l'Afrique de l'Ouest.

A la fin de cette étude nous serons à même de quantifier, pour les régions cibles choisies, l'espérance de gain, de perte et l'incertitude associée à l'utilisation des prévisions.

WP-3. Scénarios du 21^{ème} siècle

L'objectif de ce troisième et dernier volet du projet est d'évaluer a) la réponse des agro-systèmes aux changements climatiques simulés (WP-3.1), b) les conséquences en termes de coût des différentes filières (WP-3.2), et c) proposer des trajectoires d'évolution des filières techniques et de l'utilisation des terres (WP-3.3). En dernier lieu nous nous proposons de tester l'impact des réaménagements proposés, s'ils sont suffisamment importants, sur la trajectoire du changement climatique (WP-3.4) pour au moins l'un des 2 scénarios choisis.

La variabilité du climat s'exprime à des échelles diverses pouvant se caractériser par exemple par une année très différente d'une autre ou bien par des séquences longues d'années présentant des anomalies de même signe.

Si les impacts de la variabilité interannuelle du climat peuvent être anticipés et minimisés par un système de prévision saisonnière et son utilisation pour orienter les itinéraires techniques (décrit dans le WP2), il reste à prendre en compte les impacts de la variabilité à long-terme du climat, en particulier dans le contexte du changement global. Ces derniers s'expriment de manière différente car il ne s'agit plus cette fois de détecter une bonne ou une mauvaise saison agricole mais de tenter de diagnostiquer si le système agricole actuel adapté au climat présent est toujours valide sous un climat futur. A l'instar de la prévision saisonnière, ces diagnostics ne s'adresseront pas à l'agriculteur lui-même mais concerneront davantage des secteurs agricoles dans leur ensemble.

WP-3.1. Impact du changement climatique sur les ressources

L'IPSL ayant réalisé un certain nombre de scénarios (1870-2100) inclus dans le dernier rapport du GIEC (en révision), et poursuivant plusieurs études autour de ces scénarios pour évaluer leur sensibilité à une meilleure prise en compte des changements d'usage de sols ou du couplage climat-carbone, nous utiliserons dans ce projet 2 de ces scénarios, les plus contrastés (scénarios A2 et B1 du GIEC). Travailler avec ces résultats nous permettra d'avoir accès à la meilleure résolution temporelle possible des données de forçage atmosphérique, ainsi que de pouvoir évaluer l'importance des processus nouveaux développés dans le cadre de ce projet (WP-3.4).

Un ensemble de simulations du modèle ORCHIDEE sera réalisé à partir de ces 2 scénarios, en faisant notamment varier les paramètres d'itinéraires techniques (ex irrigation, fertilisation, rotations, chargement animal etc...). On évaluera l'impact du climat et d'éventuels changements d'usage des sols en termes de productivité, de disponibilité des ressources en eau et en azote, et du bilan des gaz à effet de serre. En particulier, en complément du travail réalisé dans le WP 2.3, un jeu de simulation sera réalisé pour tester de façon quantitative l'intérêt de l'utilisation des prévisions saisonnières sur le climat du 21^{ème} siècle. Pour ce faire, grâce aux adaptations type des itinéraires techniques aux années extrêmes tels qu'ils auront été définis dans le WP-2.2, il sera possible d'appliquer ces derniers lorsque la simulation climatique nous donnera de tels événements. A l'inverse on appliquera de tels changements sur des années normales (pour simuler une erreur de prévision) avec une fréquence correspondante à la probabilité d'erreur calculée dans le WP-2.2. On pourra ainsi estimer le gain réel de l'utilisation des prévisions par rapport au cas standard (i.e sans adaptation saisonnière).

WP-3.2. Estimation du coût économique du changement climatique

La réalisation d'une architecture couplée entre les modèles NEXUS et ORCHIDEE (WP-2.4) et la production des scénarios décrits ci-dessus permettra, de façon originale, une première tentative d'évaluation (i) des dommages du changement climatique et (ii) des gains potentiels de l'adaptation au changement climatique à l'échelle mondiale différents secteurs. Le premier point concerne ce WP-3.2, le second le WP-3.3. Les dommages du changement climatique sur ces secteurs sont mesurés selon les modes de résolution du modèle, en termes de perte de bénéfice net ou de perte de surplus social. Ces dommages sont essentiellement des coûts d'opportunité : le revenu net en cas de changement climatique peut être comparé soit au revenu net actuel, soit au revenu net projeté futur dans l'hypothèse d'un monde sans changement climatique. Seront étudiés tout particulièrement les conséquences redistributives (répartition des dommages).

WP-3.3. Estimation de trajectoires d'adaptation

Nous aborderons ensuite la question de la « réaction » des secteurs agricoles dans leur ensemble aux changements de conditions bio-physiques simulées par ORCHIDEE. Cette question englobe en réalité celle de l'adaptation de ces secteurs au changement climatique. L'approche que nous développerons permettra d'évaluer les trajectoires d'adaptation « optimale » (au regard de tel ou tel critère), sur une base spatialisée, des secteurs agricoles, prairiaux et forestiers à un scénario de changement climatique donné.

Le bénéfice potentiel (réduction du niveau de dommage) apporté par l'adaptation des secteurs agricoles, prairiaux et forestiers dans leur ensemble sera évalué en comparant les résultats du modèle sur un scénario avec changement climatique entre un mode où l'agriculture anticipe les contraintes climatiques versus un mode où elle n'en tient pas compte.

WP-3.4. Quelles rétroactions climatiques potentielles ?

Nous chercherons dans un premier temps à évaluer les effets climatiques induits par la réaction des secteurs agricoles et forestiers (via une modification des schémas de flux d'énergie et de carbone dans ORCHIDEE). En effet, si les réallocations proposées des terres (WP-3.3) sont importantes, elles sont susceptibles d'influencer en retour la trajectoire du changement climatique, ce que nous évaluerons en réalisant des scénarios complémentaires couplant l'atmosphère, l'océan et la surface forcés par les différentes trajectoires d'affectations des terres proposées.

Nous nous attacherons dans un deuxième temps à quantifier les effets de la prise en compte de l'irrigation sur le recyclage de l'eau continentale dans le système couplé atmosphère-surface (-océan).

Ces expériences répondront à deux questions importantes: a) la contribution de l'usage des terres et de l'irrigation au changement climatique (via les flux biogéochimiques et d'énergie) ; b) Les synergies adaptation/ mitigation du point de vue de l'usage des terres.

A la fin de cette étude nous serons à même de quantifier, pour les régions cibles choisies, l'évolution de différentes grandeurs (rendements, utilisation des ressources en eau et en azote, stockage de carbone, bilan d'eau des sols, revenus agricoles, ...) et de proposer des solutions en termes de réallocation des terres, ou d'optimisation de certains itinéraires techniques.

E. Organisation et conduite du projet :

E1. décrire l'organisation générale du projet sous forme de « work packages » en indiquant, pour chacun, ses objectifs, son responsable, les équipes impliquées et les principaux participants, son calendrier, son contenu (tâches), les résultats attendus et les « deliverables » ; un « work package » spécifique devra porter sur la coordination du projet.

Notre projet comporte 5 volets, ou 'work package' résumés dans le tableau ci-dessous. En plus des 3 volets décrits ci-dessus, nous proposons un volet coordination (WP-0) nous permettant d'assurer le suivi et la bonne insertion des différentes actions, ainsi qu'un volet 'Base de données' (WP-4) permettant d'assurer le maintien et le partage constant de toutes données nécessaires au projet.

WP-0. Coordination du projet

Le LSCE coordonnera le projet dans son ensemble. Les principales tâches de coordination, qui forment les objectifs du WP-0 seront (i) d'assurer la coordination entre les différents WP, (ii) d'organiser une réunion annuelle de projet et si nécessaire des réunions intermédiaires spécifiques par WP, (iii) de préparer les rapports intermédiaires et de fin de projet, (iv) de communiquer nos principaux résultats à l'extérieur (liens avec d'autres projets, transmissions d'informations reçues par le coordonnateur vers les participants etc..). Nous mettrons également en place un site web pour les participants du projet, avec un accès grand public.

WP-4. Bases de données

L'objectif de ce volet est de préparer les données nécessaires pour la réalisation des simulations des WP 2 et WP-3.

WP-4.1 Mise en forme des scénarios climatiques + analyse et prévisions:

Pour les différents scénarios que nous étudierons (prévisions saisonnières et siècle prochain), il s'agit de récupérer et préparer l'ensemble des données climatiques utilisées en entrée du modèle d'écosystème. Il y aura 4 jeux de données principaux : (i) La ré-analyse ERA-40 couvrant la période 1958-2001, pour servir de référence (ii) Les prévisions saisonnières de la base de données DEMETER (résolution 210 km), 44 années, 4 prévisions par an, 9 membres par simulation) pour le modèle du CEPMMT et éventuellement pour un autre modèle (ex. Météo France). Eventuellement une méthode de désagrégation spatiale sur la France pour augmenter leur résolution sera envisagée. (iii) Les scénarios climatiques A2 et B1 pour le 21^{ème} siècle, réalisés à l'IPSL dans le cadre du GIEC.

WP-4.2 Définition d'itinéraires techniques spatialisés

Il est indispensable, pour les besoins du modèle d'écosystème comme pour les besoins du modèle d'économie, de définir des cartes régionalisées d'itinéraires techniques. Le détail de ces cartes (résolution et paramètres disponibles) dépendra fortement de la région étudiée, et de la densité d'information que nous pourrions recueillir.

WP-4.3 Compilation de données technico-économiques.

Il s'agit de compiler un ensemble de données technico-économiques (par régions) pour faire fonctionner le modèle NEXUS. Ces données concernent

- des données économiques: (i) la ventilation des coûts (fixes et variables) de production associés aux paramètres techniques définis précédemment, (ii) la définition de scénarios de demande en produits alimentaires et non alimentaires dérivés de l'agriculture et de la forêt (bio-énergie notamment), et (iii) les élasticités prix et revenus calées sur un scénario de croissance, (iv) des scénarios de prix du carbone.
- des données agronomiques: compilation des rendements potentiels produits par les modèles STICS pour les cultures et itinéraires techniques considérés, dans les régions considérées, et sur la base des scénarios climatiques considérés.

WP-4.4 Synthèse bibliographique des études existantes.

PADD 2006– Projet AUTREMENT

Pour répondre à la demande du comité scientifique et stratégique du projet ADD, nous réaliserons une synthèse bibliographique des études similaires à celle proposée par AUTREMENT et réalisés par la communauté internationale en montrant à la fois les similitudes et l'originalité de l'approche que nous proposons.

PADD 2006– Projet AUTREMENT

N° WP	Titre	Objectif(s)	Responsable(s) <i>et équipes participantes</i>	Résultats attendus (deliverables)
WP-0	Coordination du projet	Coordination entre WP, réunions annuelles, rédaction de rapports, communication	N. Viovy <u>LSCE</u>	D-0.1. : site Web du projet D-0.2. : rapport final du projet
WP-1	Développement du modèle intégré biosphère/agronomie/sylviculture/économie	Mise au point du modèle intégré	N. de Noblet (WP-1.1,2) V. Gitz (WP-1.3,4) <u>Toutes équipes</u>	D-1.1. : code 'ORCHIDEE-anthropique' / écosystèmes et hydrologie/irrigation D-1.2. : code Nexus modifié D-1.3. : définition des variables d'échanges D-1.4. : plateforme de couplage entre ORCHIDEE et NEXUS
WP-2	Prévisibilité saisonnière	Définir et évaluer des outils pour anticiper sur la réponse de l'agriculture à court terme (échelle saisonnière), et éventuellement proposer un aménagement des itinéraires techniques.	F. Chevallier (WP-2.1,2) B. Sultan (WP-2.3) <u>LSCE, IRD, CIRED, LMD, INRA-Avignon</u>	D-2.1. : site web de simulation « temps réel » D-2.2. : simulation de référence (1958-2001) D-2.3. : évaluation du modèle écosystème/irrigation sur ces 44 ans D-2.4. : quantification des erreurs de prévisions et du gain d'information suivant le type de conditions climatiques (e.g. années humides, sèches, ...) avec la version standard du modèle ORCHIDEE D-2.5. : comme D-2.4. mais avec la version ORCHIDEE-anthropique D-2.6. : quantification de l'espérance de gain (et incertitude associée)
WP-3	Scénarios du 21^{ème} siècle	Evaluer a) la réponse du système agricole-sylvicole-prairial, b) les conséquences en termes de coût des différentes filières, et c) proposer des trajectoires d'évolution des filières techniques et de l'utilisation des terres.	V. Gitz , N. Viovy <u>LSCE, CIRED, IRD, LMD</u>	D-3.1. : Quantification du rôle de l'irrigation sur le recyclage de l'eau pour les climats actuel et futurs D-3.2. : cartographie de changements d'utilisation des ressources (eau, bilan de GES) et de rendements pour les 2 scénarios pour différentes périodes de 2000 à 2100 D-3.3. : cartographie des évolutions de revenu net, de la balance alimentaire, et des changements de surplus du consommateur (en mode planificateur bienveillant) pour les scénarios climatiques considérés. D-3.4. : Cartes d'utilisation des sols et d'itinéraires issu de NEXUS pouvant être utilisés par ORCHIDEE D-3.5. : nouvelle cartographie d'utilisation des ressources et de distribution des coûts nets de l'adaptation au changement climatique (mois 36) D-3.6. : cartes de changements de variables climatiques (température, précipitations, ...)
WP-4	Base de données	Préparer l'ensemble des données de forçage nécessaires à la réalisation des différentes simulations (saisonnières et séculaires)	N. Viovy , V. Gitz <u>Toutes équipes</u>	D-4.1. : fichiers de forçages atmosphériques D-4.2. : fichiers de paramètres cultureux spatialisés D-4.3. : ensemble de données économiques pour forcer NEXUS D-4.4. : Synthèse bibliographique des études existantes

PADD 2006 – Projet AUTREMENT

E2. indiquer la contribution de chaque équipe à la mise en œuvre du projet (tâches prises en charge par chaque équipe) et les modalités de coordination entre les différentes équipes

Le LSCE outre la coordination du projet prendra en charge une partie du développement du modèle d'écosystème, d'hydrologie et d'irrigation ainsi que la réalisation des simulations. Le CIRED prendra en charge le développement de la composante économique. La partie couplage entre les deux modèles et la réalisation des simulations se fera en étroite collaboration entre les équipes du LSCE et du CIRED. L'IRD prendra en charge la partie développement de la composante agronomie tropicale dans le modèle ainsi que la quantification du bénéfice d'utilisation de la prévision (en collaboration avec le LSCE, le LMD et le CIRED). Les trois équipes de l'INRA interviendront dans le projet à titre d'experts en apportant leurs connaissances des différents systèmes agronomiques. Leur rôle sera d'une part d'aider à la définition des paramétrisations introduites dans le modèle d'écosystème et également sur la définition des itinéraires techniques types. Bien entendu ils permettront également d'avoir un regard critique sur le résultat des différentes simulations. Leurs connaissances approfondies des différents agro-systèmes permettront en effet d'évaluer le degré de réalisme des changements simulés et des réaménagements et itinéraires techniques proposés par le modèle

La coordination entre les équipes sera assurée par des réunions plénières annuelles et par des réunions par volet. La première réunion plénière aura pour objectif la formalisation définitive du tableau de bord des actions à conduire et du tableau de financement. La réunion plénière de fin de projet permettra d'évaluer les résultats et leur diffusion, l'organisation et le pilotage du projet. Pour aider à la coordination, un site internet sera mis en place sur lequel sera indiqué le tableau d'avancement du projet, le compte rendu des différentes réunions, diverses informations utiles ainsi que l'accès aux bases de données nécessaire au projet.

E3. décrire le calendrier général du projet sous forme d'un échancier récapitulatif des différents « work packages », tâches, « deliverables » ; un diagramme de Gantt (déroulement des tâches dans le temps) est souhaitable.

Le tableau ci-après décrit le diagramme de Gantt des tâches du projet par trimestre. Les valeurs DX.Y indique la période de livraison du 'deliverable' X.Y.

	Année 1				Année 2				Année 3			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
WP 0		D0.1										D0.2
WP 1.1								D1.1				
WP 1.2								D1.2				
WP 1.3				D1.3				D1.4				
WP 2.1				D2.1								
WP 2.2					D2.4			D2.2	D2.3			
WP 2.3												D2.6
WP 3.1										D3.1/2		
WP 3.2											D3.3	
WP 3.3											D3.4	D3.5
WP 3.4												D3.6
WP 4.1								D4.1				
WP 4.2								D4.2				
WP 4.3								D4.3				
WP 4.4						D4.4						

E4. Le cas échéant, indiquer les coordinations prévues avec d'autres programmes ou projets de recherche, notamment ceux déposés dans le cadre du programme fédérateur ADD (appels 2005 ou 2006).

Une coordination étroite est prévue avec le projet soumis à ADD 2006 CLIMATOR porté par N. Brisson. Cette coordination est assez naturelle puisque plusieurs équipes de l'INRA sont impliquées dans les 2 projets et que des collaborations existent depuis plusieurs années entre ces équipes et le LSCE. En particulier le second volet du projet CLIMATOR consacré à la constitution de données sur les systèmes agricoles pour les modèles se fera en lien avec les WP1 et WP4. Le projet se fera en lien également avec le projet européen CARBOEUROPE (auquel participe les équipes de l'INRA) pour les aspects développement et validation du modèle d'écosystème sur sites et le projet européen ENSEMBLES sur le volet prévision saisonnières et simulations climatiques 21^{ème} siècle.

F. Difficultés et risques susceptibles de peser sur la bonne réalisation du projet et moyens prévus pour y parer

C'est au niveau du couplage entre le modèle économique et le modèle d'écosystème que se place le challenge le plus important du projet car il est entièrement nouveau et se place dans des disciplines très différentes. C'est pourquoi nous veillerons à procéder par étapes en commençant par des approches relativement simples (en particulier sur les paramètres que nous chercherons à échanger entre modèle économique et modèle d'écosystème). Une difficulté principale vient du fait que le modèle économique fonctionne sur la base d'arbitrages entre choix potentiels d'affectation de terres et d'itinéraires techniques, et que cet arbitrage requiert de connaître les rendements « potentiels » (et les coûts) de chaque culture mis en balance à un endroit donné. Ceci nécessite donc un grand nombre de simulations des modèles agronomiques, relatifs aux différents itinéraires culturaux en compétition sur les points de grille. C'est pourquoi également nous avons essayé de hiérarchiser les résultats attendus du projet entre les tâches que l'on est sûr de pouvoir assurer (notamment un premier round de simulation relatif à un ensemble bien connu de cultures mises en jeu) et celles plus prospectives et donc plus incertaines sur leur aboutissement. Il est à noter cependant que les collaborations entre CIRED et LSCE existe déjà au travers de V. Gitz depuis plusieurs années et que même si le couplage entre ORCHIDEE et NEXUS représente un objectif très nouveau il existe déjà une culture commune entre nos deux équipes. D'autre part, la proximité géographique facilite également la coordination.

G. Autres

Références

- Adams, Darius M.; Alig, Ralph J.; Callaway, J.M.; McCarl, Bruce A.; Winnett, Steven M. 1996.** The forest and agricultural sector optimization model (FASOM): model structure and policy applications Res. Pap. PNW-RP-495. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 60 pp.
- Alcamo, Joseph (ed.). 1994.** *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Cantelaube P and JM Terres (2005)** Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus*, 57A, 476-487.
- Challinor AJ, JM Slingo, TR Wheeler and FJ Doblas-reyes (2005)** Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles, *Tellus*, 57A, 498-512.
- De Cara, S.; Houzé, M.; Jayet, P.A. (2005)**, Methane and nitrous oxide emissions from agriculture *in the EU: A spatial assessment of sources and abatement costs Environmental and Resource Economics*, vol. 32, n° 4 . pp 551–583
- De Rosnay P., J. Polcher, M. Bruen and K. Laval (2002)** : Impact of a physically based root-soil moisture profiles interactions on simulated land surface processes in a GCM. *J. of Geophysical. Research. Vol. 107, D 11, 10 : 1029.*
- De Rosnay P., J. Polcher, K. Laval, M. Sabre, (2003)**: Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over Indian Peninsula. *Géophys. Res. Lett.*, Vol 31, N°19, 10.1029.
- Ducharne A., C. Golaz, E. Leblois, K. Laval, E. Ledoux, and G. de Marsily (2003)** : RiTHM, a Runoff Routine Scheme for GCMs. *J. of Hydrology. Vol 280, 207-228.*
- Ducoudré N, Laval K, Perrier A (1993)** SECHIBA a new set of parametrizations of the hydrologic exchanges at the land/atmosphere interfaces within the LMD atmospheric general circulation model. *Journal of Climate* 6
- Entin, J.K., A. Robock, K.Y. Vinnikov, V. Zabelin, S. Liu, A. Namkhai and Ts Adyasuren (1999)** : Evaluation of Global Soil Wetness Project soil moisture simulations, *J. Meteor Soc Japan*, 77, pp 183-198
- Gitz Vincent, Hélène Ollivier, Hubert Marie-Hélène (2006)**. Politique des usages des terres sous contrainte énergétique et climatique: une approche par la modélisation. Working paper CIRED.
- Godard, C.; Bamière, L.; Debove, E.; De Cara, S.; Jayet, P.A.; Niang 2005, N.B.** Interface between agriculture and the environment: integrating yield response functions in an economic model of EU agriculture *A paraître dans Modelling agricultural policies: state of the art and new challenges. Proceedings of the 89th european seminar of the european association of agricultural economists (Parma Italy, february 3–5, 2005), Arfini, F. (éd.) 89. EAAE Seminar: Modelling agricultural policies, state of the art and new challenges Parme (ITA) 2005/02/03; 2005/02/05*
- Hansen, J.W., 2002.** Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture : issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, 74, 309-330.
- Hansen, J.W., 2002.** Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture : issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, 74, 309-330.
- Heckelei, T., and W. Britz (2001)**: Concept and Explorative Application of an EU-wide Regional Agricultural Sector Model (CAPRI-Projekt). In: Heckelei, T., H.P. Witzke, and W. Henrichsmeyer (Eds.): *Agricultural Sector Modelling and Policy Information Systems. Proceedings of the 65th EAAE Seminar, March 29-31, 2000 at Bonn University, Vauk Verlag Kiel, pp. 281-290.*

- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Polcher J, Prentice IC (2005)** A dynamical global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19:GB1015, doi:10.1029/2003GB002199
- Marletto et al. (2005)** Evaluation of downscaled DEMETER multi-model ensemble seasonal hindcasts in a northern Italy location by means of a model of wheat growth and soil water balance, *Tellus*, 57A, 488-497.
- Milly, P.C.D. & A.B. Shmakin (2002)**. Global modeling of land water and energy balances. Part I: The Land Dynamics (LaD) model, *J. Hydrometeor.*, 3, 283-299.
- Ingram, K.T., M.C. Roncoli, and P.H. Kirshen, 2002**. Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems*, 74, 331-349.
- Sands R., M. Leimbach, 2003**, “Modeling Agriculture and Land Use in an Integrated Assessment Framework”, *Climatic Change* 56: 185-210.
- Sands R., J. Edmonds, 2005**, “Climate change impacts for the conterminous USA: an integrated assessment. Part 7: Economic analysis of field crops and land-use with climate change.”, *Climatic Change* 69: 127-150.
- Schneider U., Nilsson S., Lewandowski I., Schmid E., Montaranelle L., McCarl B, Williams J., <http://www.uni-hamburg.de/Wiss/FB/15/Sustainability/schneider/EU-FASOM/>.
- Scholze M., Bondeau A., Ewert, F., Kucharik Ch., Priess J., Smith., 2005**: Advances in large-scale crop modelling. *EOS*, Vol. 86, N. 26