



HAL
open science

Evaluation des impacts du changement climatique dans les différents vignobles de France

I. García de Cortázar-Atauri, Nadine N. Brisson, Olivier Jacquet, Jean-Christophe Payan, Marion Claverie, Elian Salancon, Jean-Claude Fournioux, Christine Monamy, Damien Le Sueur, Gérard Barbeau, et al.

► To cite this version:

I. García de Cortázar-Atauri, Nadine N. Brisson, Olivier Jacquet, Jean-Christophe Payan, Marion Claverie, et al.. Evaluation des impacts du changement climatique dans les différents vignobles de France. Séminaire STICS 2007, Mar 2007, Reims, France. hal-02757408

HAL Id: hal-02757408

<https://hal.inrae.fr/hal-02757408v1>

Submitted on 4 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SEMINAIRE



Annales 2007

▶ 20 au 22 mars à Reims ◀



INRA

COMITE D'ORGANISATION

Nicolas BEAUDOIN
Valérie DAZIN
Jérôme DUVAL
Agnès GUZZI
Emilie JUMEAUCOURT
Florence LECUYER
Annabelle LEMAIRE
Dominique RIPOCHE
Brigitte ROCOURT
Pascal THIEBEAU
Aline WAQUET

Programme du séminaire

Reims du 20 au 22 mars 2007

Journée du 20/03/2007

	Orateur	Horaire	Lieu
Accueil des participants		11h30-13h45	Hall
<i>Repas éventuel au self service</i>			<i>Self</i>
Les mots d'accueil			Van Gogh
	G. Gosse	13h45-13h55	
	T. Doré	13h55-14h00	
	N. Beaudoin	14h00-14h05	
Sessions plénières de l'après-midi du 20/03 conduite par J.L. DURAND			Van Gogh
Session plénière : quoi de neuf ?			Van Gogh
Nouveautés du modèle et des outils autour de STICS	N. Brisson	14h05-14h25	
STICS et RECORD	F. Garcia	14h25-14h45	
Session plénière thème 1 : Adaptabilité du modèle à l'innovation en agriculture		14h45-15h45	Van Gogh
Jusqu'où STICS peut-il aller pour suivre l'innovation de l'agriculture ?	E. Justes	14h45-15h05	
Comment utiliser STICS sur une nouvelle culture ?	I. Garcia de Cortazar	15h05-15h25	
Présentation des posters du thème 1	T. Sterckeman	15h25-15h45	
<i>Pause café</i>		<i>15h45-16h15</i>	<i>Cafétéria</i>
Session plénière thème 2 : Utilisation du modèle		16h15-17h15	Van Gogh
Utilisation pour produire des références : expertise sécheresse	F. Huard	16h15-16h35	
Utilisation inverse des modèles	M. Guérif	16h35-16h55	
Présentation des posters du thème 2	P. Thiébeau	16h55-17h15	
Visite des posters thèmes 1 et 2		17h15-18h00	Monet
Tables rondes		18h00-19h15	
Thème 1 : Adaptabilité	Animateurs : S. de Tourdonnet et T. Nesme	18h00-19h15	Van Gogh
Thème 2 : Utilisation du modèle	Animateurs : F. Levraut et S. Buis	18h00-19h15	Renoir
<i>Dîner</i>		<i>A partir de 19h30</i>	<i>Self aménagé</i>
<i>Visite guidée du Centre de Reims (facultatif) ou quartier libre : Bus de la Maison des Agriculteurs vers l'Office du Tourisme</i>		<i>20h45</i>	
<i>Bus direct de la Maison des Agriculteurs vers les hôtels</i>		<i>21h30</i>	
<i>Bus de l'Office du Tourisme vers les hôtels</i>		<i>22h30</i>	

Journée du 21/03/2007

<i>Bus au départ de l'hôtel Best</i>		<i>7h45</i>	
<i>Passage du bus à l'hôtel Les Reflets Bleus</i>		<i>7h55</i>	
Sessions plénières de la matinée du 21/03 conduites par Pierre-Alain Jayet			Van Gogh
Session plénière thème 3 : Effets cumulatifs à long terme		8h15-9h15	Van Gogh
Successions culturales sous STICS	N. Beaudoin	8h15-8h35	
Herbacées pérennes sous STICS	F. Ruget	8h35-8h55	
Présentation des posters du thème 3	M. Martin	8h55-9h15	

Session plénière thème 4 : STICS et couplage		9h15-10h15	Van Gogh
Couplage STICS-SAIL	M. Weiss	9h15-9h35	
Couplage STICS et modèle économique	A. Reynaud	9h35-9h55	
Présentation des posters du thème 4	J.E. Bergez	9h55-10h15	
Pause café et visite des posters thèmes 3 et 4		10h15-11h15	Cafétéria/Monet
Photo de groupe		10h15	Annonce micro
Tables rondes		11h15-12h30	
Thème 3 : Effets cumulatifs	Animateurs : F. Affholder et G. Hellou	11h15-12h30	Van Gogh
Thème 4 : Couplage	Animateurs : A. Chanzy et N. De Noblet	11h15-12h30	Renoir
Session plénière thème 5 : Base de données		12h30-13h30	Van Gogh
Base de données sol et fonctions de pédotransfert	C. Le Bas	12h30-13h50	
Base de données STICS	D. Delannoy	12h50-13h10	
Présentation des posters du thème 5	E. Baranger ou E. Lebove	13h10-13h30	
Repas		13h30-15h00	Farman Mermoz Guillaumet
Session plénière de l'après-midi du 21/03 conduites par B. Gabrielle			Van Gogh
Session plénière thème 6 : Sol			Van Gogh
Structure du sol : modélisation et impact sur la culture	J. Roger-Estrade	15h00-16h00	
Le bilan d'azote dans STICS : ce qui y est ou n'y est pas	B. Mary	15h20-15h40	
Présentation des posters du thème 6	B. Nicolardot	15h40-16h00	
Visite des posters thèmes 5 et 6		16h00-16h30	Monet
Pause café		16h30-17h00	Cafétéria
Tables rondes			
Thème 5 : Bases de données	Animateurs : C. Godard et J.P. Ramel	17h00-18h15	Van Gogh
Thème 6 : Sol	Animateurs : J. Roger- Estrade et P.Y. Bernard	17h00-18h15	Renoir
Dîner festif		A partir de 19h00	Self aménagé
Départ des bus de retour vers les hôtels		23h00	

Journée du 22/03/2007

Bus au départ de l'hôtel Best		7h45	
Bus au départ de l'hôtel Les Reflets Bleus		7h55	
Retrait des Posters			
Sessions plénières de la matinée du 22/03 conduite par P. Debaeke			Van Gogh
Restitution des tables rondes par les rapporteurs et débat		8h15-10h15	
Pause café		10h15-10h45	Cafétéria
Session plénière sur le fonctionnement du groupe STICS			
Propositions pour relancer la dimension collective de STICS	B. Mary	10h45-11h10	Van Gogh
Discussion et prise de décisions animées par M. Launay		11h10-12h00	
Conclusion du séminaire	N. Brisson	12h00-12h15	Van Gogh
Départ et repas éventuel au self		12h30	

THEME 1

JUSQU'OU STICS PEUT-IL ET DOIT-IL EVOLUER POUR SUIVRE L'INNOVATION DANS LES SYSTEMES DE CULTURE ?

HOW COULD STICS MODEL REPRESENT INNOVATIVE CROPPING SYSTEMS ?

E. Justes*, P. Debaeke

INRA, UMR INRA-ENSAT 1248 AGIR, BP 52627, F-631326 Castanet-Tolosan Cedex
Eric.Justes@toulouse.inra.fr

Introduction

Alors que la communauté des concepteurs et utilisateurs de STICS fête ses 10 ans d'existence, il n'est pas vain de dire que le modèle STICS est à la croisée des chemins. Quel avenir pour STICS alors que la plateforme de modélisation RECORD est mise en place par l'INRA ? Quelles réponses attendre de STICS pour une agronomie s'inscrivant dans le cadre du développement durable ?

Le modèle STICS a vécu sa pleine période de croissance et de développement avec une large extension de son périmètre d'action (ajouts d'un grand nombre de formalismes, adaptation à près d'une trentaine de cultures, couplage avec d'autres outils) et le soutien d'une vaste communauté d'utilisateurs (dépassant le cadre strict de l'agronomie). Aujourd'hui, il entre dans sa période de maturité, où il doit bien gérer ses choix... et conserver son attrait pour de nouveaux utilisateurs tout autant que pour les utilisateurs « habituels ».

Parmi les défis qui lui sont lancés, demandons nous comment STICS peut intégrer en continu l'innovation en agriculture. Nous n'apporterons pas ici une réponse unique à cette question, simplement quelques éléments de réflexion pour contribuer à une discussion constructive sur le devenir de l'outil.

Tout d'abord, nous pensons qu'il est nécessaire de repartir du cahier des charges initial élaboré au milieu des années 90 (Brisson et al., 1998). Le modèle se voulait générique et robuste. Générique, dans le sens où une grande variété de cultures pouvait être simulée avec le même formalisme (au choix d'options près), laissant à l'estimation des paramètres le soin de combler les différences entre espèces. Robuste, afin de simuler sans biais et avec une précision suffisante les bilans dynamiques du carbone, de l'eau et de l'azote pour divers pédoclimats et divers systèmes de culture. Ces deux objectifs étaient à eux seuls très ambitieux ! La crédibilité du modèle repose sans aucun doute sur la réalité de ces deux critères. Rajoutons à cela que, selon son cahier des charges, le modèle de culture STICS n'a pas été conçu comme une modèle de synthèse des connaissances « actuelles » sur le fonctionnement du système sol-plante-atmosphère mais comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles (nécessité de données d'entrées faciles d'accès). De plus, sa vocation n'est pas de rendre compte des variations de la culture ou du milieu à des pas de temps courts (< décade) ni à des pas de temps longs (> 5 ans). Enfin, STICS n'est pas, en soi, un outil d'aide à la décision.

Quel est le domaine de validité actuel de STICS ?

Une analyse objective, un peu systématique, de la qualité prédictive du modèle dans sa version actuelle avec un paramétrage « officiel » serait nécessaire, en préalable à tout bilan des performances actuelles du modèle. Une analyse historique, plus difficile à conduire, permettrait de mesurer les progrès accomplis. A-t-on vraiment progressé dans la prévision des principales variables d'intérêt agronomique ou a-t-on étendu la gamme de validité du modèle ?

Le travail d'évaluation est ingrat, peu valorisant et difficilement valorisable aujourd'hui. De fait, on dispose davantage d'études utilisant les sorties de STICS que de travaux évaluant les performances. La constitution d'une base de données partagée a souvent été discutée lors des séminaires STICS mais sa mise en œuvre s'est heurtée à une certaine inertie. Il ne reste aux utilisateurs, notamment s'ils ne sont pas agronomes, qu'à faire confiance aux sorties du modèle... Est-ce toujours raisonnable ?

A-t-on aujourd'hui atteint les limites de la généralité ? STICS a montré sa capacité à s'adapter à une large gamme de cultures en climat tempéré, méditerranéen et tropical. Alors qu'on s'intéresse de plus en plus à la variabilité intra-spécifique, on peut observer la difficulté du modèle à prendre en compte de manière suffisamment précise les spécificités variétales. La généralité est ici une limite à la représentation des interactions variété-milieu-système de culture.

STICS et l'innovation en agriculture

Nous entendons par « innovation en agriculture » des travaux de recherche visant à évaluer et à concevoir des conduites ou des systèmes de cultures exprimant une rupture ou une évolution marquée par rapport aux pratiques classiques bien établies. Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut évoquer : l'évolution vers des systèmes à bas niveaux d'intrants (eau, azote, pesticides), en particulier l'agriculture biologique, le

développement des techniques sans labour (avec ou sans mulch vivant), la pratique des cultures associées, des innovations variétales majeures ou des changements de périodes de semis (du printemps vers l'automne)... Cette complexification du cadre initial est-elle toujours compatible avec la structure du modèle ? Comment le modèle STICS peut-il accompagner cette innovation ? Faut-il complexifier davantage le modèle ? Peut-on, et doit-t-on, chercher à représenter de la même manière qu'actuellement -et donc en cohérence avec le cahier des charges- les processus biophysiques au cœur des systèmes innovants ? Il nous paraît évident que la réponse ne peut pas être unique mais dépend du type d'innovation à intégrer dans le modèle. On peut toutefois noter que la volonté et la capacité des concepteurs de STICS pour réaliser ces innovations sont assez remarquables. Il est néanmoins important de s'assurer que l'intégration de ces innovations peut parfois entraîner des effets collatéraux sur la robustesse du modèle, sans que leur évaluation ne soit toujours réalisée. C'est sans doute un point crucial à en prendre compte.

STICS est tout à fait légitime pour réaliser des simulations de scénarios où les facteurs eau et azote sont pris en compte en interaction avec les types de sol et les climats (en particulier dans le cadre du changement climatique et de la fréquence accrue des sécheresses). Ainsi, sous réserve que le modèle soit validé pour les cultures concernées, l'utilisation du modèle semble tout à fait adéquate pour évaluer des adaptations des systèmes actuels, peut être plus que des innovations majeures. Par exemple, il est possible de simuler des changements de date de semis dans la mesure où les fonctions physiologiques prenant en compte l'effet de la température, de la photopériode et de la vernalisation sont bien paramétrées. De la même manière, la simulation de cultures intercalaires pièges à nitrates a été possible car les adaptations réalisées étaient compatibles avec la structure pluri-annuelle du modèle.

STICS est-il un modèle de systèmes de culture ? Dans la mesure où il simule le devenir des résidus de récolte et l'évolution pluri-annuelle des stocks d'eau et d'azote ainsi que leurs impacts sur la culture suivante, il contribue à représenter le fonctionnement d'une succession de cultures mais ne prend pas en compte la dynamique des bioagresseurs et des autres composantes biologiques.

Pour représenter le fonctionnement des systèmes de culture innovants, valorisant ou subissant de plus fortes interactions avec les facteurs biotiques, on invoque souvent la nécessité de représenter les bioagresseurs dans les modèles. Il s'agit davantage de modéliser l'interaction avec le bioagresseur (effets sur la capture des ressources et la production finale) que la dynamique épidémique ou la démographie pluri-annuelle, qui sont en général gérées par des modèles spécifiques, éventuellement interfacés. La diversité des stratégies des bioagresseurs constitue une limite à leur représentation dans les modèles de culture. Il y a peu d'exemples où une approche générique ait réussi à contourner ce problème. Aussi, on doit vraiment se demander s'il faut que STICS prenne en compte ces facteurs limitants.

Quelle(s) évolution(s) pour STICS ?

Il nous semble prioritaire de poursuivre l'effort collectif visant à préciser le domaine de validité opérationnel du modèle STICS afin de « sécuriser » les nombreuses utilisations qui sont faites de l'outil. Cela passe sans doute par i) la stabilisation d'une version du modèle pour un temps donné, et ii) par la proposition d'un paramétrage consolidé et « accrédité par l'équipe STICS » pour différentes cultures.

Dans un second temps, face aux limites inhérentes du modèle, liées en partie au choix de formalismes génériques, il serait bon de s'interroger sur ce que le modèle ne peut pas faire par construction ou qu'il n'est pas souhaitable d'engager pour préserver l'équilibre global du modèle et rester conforme au cahier des charges initial.

Il n'en reste pas moins que le modèle STICS semble bien adapté pour aider à l'évaluation de systèmes ou conduites innovants basés sur la gestion conjointe de l'azote et de l'eau à une échelle annuelle ou pluriannuelle. Ainsi des travaux en cours montrent son intérêt pour l'évaluation de la gestion de l'azote en système biologique ou pour la représentation de cultures associées. Par contre, compte tenu de l'exigence de généralité, il n'est pas certain que des questions liées à l'innovation variétale puissent être correctement prises en charge.

Une autre façon de répondre à la question serait d'analyser pour quelles raisons les modèles développés depuis plus de 20 ans (EPIC, CropSyst...) se sont arrêtés d'évoluer à un moment donné.

Enfin, il est clair que notre propos n'avait pas objectif de traiter de la question de l'évolution de la structure informatique ni de la modularité effective de STICS, qui est enclenchée, et qui pourrait constituer une évolution majeure du modèle en vue de sa stabilisation et de son statut futur.

Références

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

Le cahier des charges de STICS.

COMMENT UTILISER STICS SUR UNE NOUVELLE CULTURE ? L'EXEMPLE D'ADAPTATION A LA VIGNE (*VITIS VINIFERA* L.)

HOW TO USE STICS ON A NEW CROP ? THE EXAMPLE OF ADAPTATION TO THE GRAPEVINE (*VITIS VINIFERA* L.)

García de Cortázar Aauri I.^{1*}, Brisson N.

¹ Unité Agroclim, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914, Avignon cedex 9
igarcia@avignon.inra.fr

Dans le cadre de l'adaptation du modèle STICS à une nouvelle culture, Launay *et al.* (2005) avaient présenté une méthodologie issue de l'expérience de plusieurs utilisateurs. Cette méthodologie a déjà été testée pour le lin (Flenet *et al.*, 2005). Depuis 2002, nous avons réalisé l'adaptation du modèle STICS à la vigne (García de Cortázar Aauri, 2006). Dans le cadre de ce travail, nous avons appliqué la méthodologie préconisée par Launay *et al.* (2005). Nous allons décrire par la suite les différentes étapes de cette adaptation.

La compréhension de la plante et du modèle. Choix de formalismes

Pour commencer il est nécessaire de connaître la plante que nous allons adapter. Ainsi, selon les caractéristiques principales de notre culture, nous allons pouvoir déterminer quels sont les processus les plus importants à caractériser pour réaliser une bonne adaptation du modèle.

Dans notre cas, Gary *et al.* (2003) avaient déjà défini les principales caractéristiques de la vigne : plante pérenne (un système racinaire déjà établi au début du cycle végétatif, qui contient en outre des réserves carbonées et azotées), à croissance indéterminée (compétition trophique entre les feuilles et les fruits) et à fruits charnus (dynamiques particulières de l'eau et du carbone), cultivée pour la qualité et la quantité, souvent en conditions limitantes d'eau et d'azote. Il existe plusieurs structures de plantation, mais toutes relativement ouvertes, correspondant à des structures en rang. Par ailleurs, la culture de la vigne comporte beaucoup de spécificités dans sa conduite, visant à maîtriser le feuillage et le rendement. Il s'agit de techniques de rognage, effeuillage, éclaircissage et taille. A partir de ces caractéristiques, une étude approfondie du modèle a permis de déterminer quels sont les modules, ou formalismes, qui sont les plus importants à modifier, adapter ou intégrer. Dans notre cas le travail principal sur le modèle a été réalisé sur : le calcul de la date de débourrement ; la description des différents processus de la croissance de la maturation des baies ; l'introduction du calcul du potentiel foliaire de base ; le contrôle de la description de la structure du feuillage faite par le modèle ; une révision de la gestion des réserves carbonées et azotées ; la gestion de l'azote dans la plante ; la sénescence.

Description de la méthodologie utilisée pour le paramétrage et la validation du modèle

La deuxième partie de l'adaptation du modèle STICS à la culture de la vigne concerne la détermination des différents paramètres décrivant la croissance, la structure et le développement de la plante. Ceci ne concerne pas l'ensemble des paramètres du modèle. Le nombre final de paramètres à affecter dépend des choix des formalismes. Par ailleurs, certains paramètres sont supposés dépendants de la variété, les autres sont supposés valables pour l'ensemble de l'espèce. Launay *et al.* (2005) et Flenet *et al.* (2005) proposent plusieurs voies pour réaliser le paramétrage :

- ❖ la recherche dans la **bibliographie** existante. Dans ce cas, la valeur du paramètre est directement obtenue à partir des travaux d'écophysiologie ou à partir d'autres modèles déjà existants sur la plante. Cependant, il est important de s'assurer que le paramètre trouvé dans la bibliographie correspond bien à la même définition que celle de STICS ;
- ❖ le calcul à partir de **données expérimentales** spécifiques. Dans certains cas, le paramètre est mesuré directement. Dans d'autres cas, toutes les variables du formalisme considéré sont mesurées et on estime le paramètre par un calcul analytique ;
- ❖ par **analogie** avec d'autres plantes. Certains paramètres peuvent être déterminés par analogie avec d'autres plantes (sur la croissance foliaire, la croissance racinaire et la courbe de dilution) ;
- ❖ par **optimisation**. Dans certains cas, la valeur du paramètre ne peut être obtenue par les méthodes citées précédemment. C'est notamment le cas si le paramètre a une valeur purement statistique ou s'il est très difficile de mettre en place des expérimentations pour le mesurer ou le calculer. Ces paramètres sont alors déterminés par optimisation. Une gamme de valeurs possibles de ce paramètre est examinée et la valeur qui minimise la différence entre les simulations et les mesures réalisées sur le terrain est retenue.

Dans le cas de la vigne, nous avons identifié 139 paramètres qui décrivent le fonctionnement du développement et de la croissance. De cet ensemble de paramètres, 122 ont été déterminés à partir des deux premières méthodes (expérimentations spécifiques et bibliographie) (García de Cortázar Aauri, 2006). Les

valeurs des 17 paramètres restants ont été obtenues par optimisation. Dans notre cas, seuls les paramètres qui vont définir le rendement et le développement ont été considérés comme dépendants de la variété, et donc le reste comme dépendant de l'espèce.

Méthodologie d'optimisation utilisée

Le choix des paramètres qui ont été optimisés s'est fait à partir de l'analyse de sensibilité de STICS réalisée par Ruget *et al.* (2002), et tenant compte des particularités de la vigne qui n'avaient pas été prises en compte dans le travail mentionné ci-dessus. Le tableau 1 liste les paramètres concernés, ainsi que les "modules" dans lesquels ils interviennent et les variables de sortie qu'ils contrôlent et à partir desquelles ils vont être ajustés.

La méthode d'optimisation utilisée est la méthode d'estimation séquentielle par module (Makowski *et al.*, 2006). Cette méthode procède par des optimisations successives de groupes de paramètres : tandis que les valeurs d'un groupe de paramètres sont ajustées par optimisation, les valeurs des autres paramètres sont fixées par expertise. Elle a été appliquée avec succès pour l'adaptation du modèle STICS à différentes espèces cultivées

Module	Paramètre	Espèce / variété	Variable
FEUILLAGE	DLAIMAXBRUT	Espèce	LAI
	INNSENES	Espèce	
	RAPSENTURG	Espèce	
CROISSANCE EN BIOMASSE	EFCROIVEG	Espèce	Biomasse Totale sèche (t/ha)
	EFCROIREPRO	Espèce	
	REMOBRES	Espèce	
REPARTITION	SLAMAX	Espèce	LAI
COMPETITION	SPFRMIN	Espèce	LAI / Nombre des Fruits (Fruits/m ²)
	SPLAIMIN	Espèce	
RENDEMENT	AFRUITPOT	Variété	Nombre de fruits (Fruits/m ²)
	PGRAINMAXI	Variété	Biomasse sèche des fruits (t/ha)
	VITIRAZO	Espèce	Quant. Azote Fruits (kg/ha)
EAU	DESHYDBASE	Variété	Teneur en eau (%)
	TEMPDESHYD	Espèce	
	RSMIN	Espèce	
AZOTE	VMAX2	Espèce	Quantité totale d'azote dans la plante (kg/ha)
	INNIMIN	Espèce	

ou à de nouvelles variétés (Launay *et al.*, 2005). Son utilisation permet d'obtenir des informations intéressantes pour la compréhension du système.

Pour réaliser l'optimisation, il est nécessaire de mettre en place une expérimentation dans laquelle on obtient des mesures de bonne qualité des différentes variables importantes qui décrivent la croissance et le développement de notre plante : la biomasse sèche végétative et des fruits, le LAI, le bilan hydrique, la phénologie, la teneur en azote dans le sol, la quantité d'azote dans la plante et dans les fruits, et certaines composantes du rendement et de la qualité de la récolte. Dans notre cas, toutes ces données ont été observées et/ou mesurées dans le cadre d'expérimentations réalisées au cours des années 2004 et 2005, en étroite collaboration avec les organismes

Tableau 1. Liste des paramètres à optimiser, en fonction du module auquel ils appartiennent, de la variable qu'ils contrôlent, et de leur caractère variétal ou spécifique.

présents dans ces différentes régions viticoles (Côtes du Rhône, Languedoc, Bourgogne, Bordeaux, Cognac, Anjou et Champagne), sur des parcelles avec un mode de conduite compatible avec les hypothèses de fonctionnement du modèle, et de plus **non irriguées et non enherbées**. Nous avons pu ainsi réunir 43 jeux complets de données correspondant à des situations agroclimatiques variées, comprenant 8 cépages, 13 types de sol et différents types d'itinéraires de cultures.

L'outil utilisé pour le paramétrage par optimisation est un programme fourni avec STICS, qui est basé sur la méthode du **simplex**. Cette méthode permet d'optimiser plusieurs paramètres sur une ou plusieurs variables. Le critère optimisé est un critère des moindres carrés pondérés (Makowski *et al.*, 2006). La qualité du paramétrage a été évaluée par plusieurs critères statistiques pour quantifier la divergence entre les données observées et celles simulées (Brisson *et al.*, 2002) : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ; la RMSEs (systématique) détermine le biais du modèle ; la RMSEu (*unsystematic*) détermine la dispersion du modèle autour de la droite de régression entre valeurs observées et valeurs simulées par le modèle ; le biais moyen (Mean Deviation, MD) ; l'efficacité du modèle (EF) est calculée sur la base de la variance du modèle comparée à la variance expérimentale. Ces critères statistiques ont été calculés une fois effectué le paramétrage, pour évaluer les limites du modèle. La qualité du paramétrage de la vigne est commentée de manière exhaustive dans Garcia de Cortázar Aauri (2006).

Optimisation des paramètres en utilisant le forçage du LAI

Nous avons utilisé la version de STICS qui permet de forcer le LAI à partir des données mesurées (Brisson *et al.*, 2003), car notre objectif dans un premier temps était de fixer un certain nombre de paramètres, en maîtrisant cette variable d'état centrale dans le modèle. Les dates de débourrement et de récolte ont été fixées, pour également contrôler le cycle de croissance et le développement de la vigne.

1. Optimisation et ajustement des paramètres du sol

Dans un premier temps, nous avons voulu nous assurer que les caractéristiques du sol et d'établissement de la culture étaient bien établies.

- Utilisation de la **méthode d'inversion du modèle** à partir des données de **potentiel foliaire de base** (Payan *et al.*, 2005, Garcia de Cortázar Aauri, 2006). Cette méthode a été utilisée dans les parcelles où

avaient été faites des mesures de potentiel de base, pour réaliser un ajustement des paramètres sol. Pour

- cela, nous avons utilisé l'ensemble des mesures d'une même parcelle (toutes années climatiques confondues), en tenant compte du cépage et du porte-greffe. D'autre part, le paramètre $Q0$ a été ajouté à la liste des paramètres à optimiser (Dorsainvil, 2002).
- Ajustement du **paramètre $Q0$ à partir de la réserve hydrique du sol**. Dans les parcelles où nous avons des mesures d'humidité des différents horizons du sol, nous avons calculé la réserve hydrique totale du sol. Celle-ci a servi à l'ajustement du paramètre $Q0$, ainsi qu'au contrôle des différentes valeurs des caractéristiques hydrodynamiques du sol.

Dans notre cas, nous avons obtenu une bonne simulation du potentiel de base par STICS. La simulation de la réserve hydrique se montre aussi très satisfaisante. Ces résultats nous ont permis de considérer que les différents paramètres du sol étaient à présent bien ajustés, et donc qu'ils pouvaient être utilisés par la suite, de manière à assurer un bon fonctionnement du sol. Nous avons aussi remarqué l'importance de l'impact du paramètre $Q0$ sur le calcul du bilan hydrique du sol (Dorsainvil, 2002), et donc la nécessité de considérer l'optimisation de ce paramètre pratiquement comme obligatoire (Tableau 2).

	Ψ_b	Réserve totale en
	Mpa	mm
Nombre	78	156
Moyenne	-0.41	333.11
Efficiences du	0.85	0.94
RMSE	0.09	25.84
RRMSE	-0.23	0.08
RMSEs	0.01	11.51
RMSEu	0.09	23.14
MD	0	-2.76

Tableau 2. Résultats des différents critères statistiques appliqués aux différentes variables étudiées.

2. Optimisation des paramètres plante qui dépendent du LAI

Seuls les paramètres qui permettent de simuler la croissance totale et ses dépendances (azote) ont été optimisés avec forçage du LAI : les paramètres qui déterminent l'efficacité de conversion et qui gèrent la croissance en biomasse (*EFCROIVEG*, *EFCROIREPRO*) ; le paramètre qui contrôle la remobilisation des réserves (*REMOBRES*) ; et un paramètre qui est directement lié à l'alimentation azotée de la plante (*VMAX2*). L'optimisation de ces paramètres a été réalisée simultanément par rapport aux données mesurées de biomasse sèche totale (t/ha) (*MASEC*) et de quantité d'azote total dans la plante (kg/ha) (*QNPLANTE*). Ces paramètres ont été considérés dépendants de l'espèce.

3. Optimisation des paramètres plante sans forçage du LAI

Tous les autres paramètres ont été optimisés sans forçage du LAI, car leur valeur contrôle le LAI ou dépend de rétroactions feuilles-fruits.

- Optimisation des **paramètres dépendants de l'espèce**. Pour cela, nous avons utilisé toutes les données, sans tenir compte du cépage. Dans un premier temps, nous avons réalisé une optimisation des paramètres qui gèrent les différentes composantes du feuillage (*INNIMIN*, *INNSEN*, *RAPSENTURG*, *DLAIMAXBRUT*, *SLAMAX*), les niveaux minimaux de contrainte trophique (*SPLAIMIN*, *SPFRMIN*) et la résistance stomatique (*RSMIN*). Pour tenir compte de la concurrence entre les feuilles et fruits pendant la croissance, nous les avons optimisés simultanément par rapport au LAI et à la matière sèche des fruits (*MAFRUIT*), de façon à bien représenter la compétition feuille-fruits. La quantité d'azote totale dans la plante (*QNPLANTE*) était aussi utilisée pour l'ajustement de *INNIMIN*. Ensuite, nous avons optimisé séparément deux paramètres en fonction de la variable de sortie qu'ils contrôlent : *VITIRAZO* par rapport à la quantité d'azote dans les fruits (*QNGRAIN*) et *TEMPDESHYD* par rapport à la variable teneur en eau des fruits à la récolte (*H2OREC*).
- Optimisation des **paramètres variétaux**. Certains paramètres ont été considérés comme dépendants de la variété. Ces paramètres ont été optimisés en utilisant pour chaque variété, toutes les régions où ils étaient présents (cas du Pinot noir et du Chardonnay en Bourgogne et Champagne). Les paramètres qui sont liés au rendement (*AFRUITPOT*, *PGRAINMAXI*) ont été optimisés ensemble, par rapport au nombre de fruits (*NBFRUIT*), le LAI et la matière sèche des fruits (*MAFRUIT*) simultanément. L'introduction de la variable LAI dans cette optimisation avait aussi l'objectif de tenir compte de la compétition feuille-fruit. Enfin, *DESHYDBASE* a été optimisé par rapport à la teneur en eau des fruits à la récolte (*H2OREC*).

Dans notre étude, les estimations de la biomasse totale (fraîche et sèche) et celle des fruits s'avèrent correctes. Cependant, il faut tenir compte des réserves, pour l'interprétation de certaines sorties comme le poids de bois de taille (toujours sous-estimé). En ce qui concerne le feuillage, il faut remarquer que la simulation du LAI n'est pas réalisée très correctement par le modèle. La valeur mesurée de cette variable reste très sensible à l'échantillonnage. Les variables qui composent le rendement dépendent largement de la variété en accord avec la bibliographie. Le développement de la plante est bien simulé de façon générale (débourrement, floraison et véraison). La date du débourrement semble être très dépendante du climat de la parcelle (Tableau 3).

	LAI	Matière sèche totale	Matière sèche fruits	Quantité N plante	Quantité N fruits	Nombre des fruits	Eau à la récolte
	m ² feuilles/m ² sol	t/ha	t/ha	kg N/ha	kg N/ha	fruits/m ²	%
Nombre d'observations	162	161	79	88	67	33	40
Moyenne	1.05	2.8	2.87	31.37	12.25	1105.24	0.78
Efficience du modèle	0.29	0.8	0.68	0.33	0.4	0.37	0.81
RMSE	0.54	1.14	0.87	16.7	8.92	464.63	1
RRMSE	0.51	0.41	0.3	0.53	0.73	0.42	1
RMSEs	0.14	0.55	0.35	3.94	4.17	200.73	0
RMSEu	0.52	1	0.8	16.23	7.88	419.04	1
MD	-0.14	-0.55	-0.11	-3.23	0.64	98.6	0

Tableau 3. Résultats des différents critères statistiques appliqués aux différentes variables étudiées.

Validation du Modèle

La validation du modèle permet de tester sa robustesse dans des scénarios variés. Cette robustesse est définie comme la capacité de l'outil à fournir des résultats satisfaisants dans une gamme étendue de conditions. Pour cela il est nécessaire de se doter d'une base de données indépendante. Nous avons utilisé une base de données créée à partir de données issues d'expérimentations anciennes de différents organismes partenaires de notre étude. Les résultats se sont avérés satisfaisants, sachant que la qualité du jeu de données utilisé pour la validation était très large et variée (Tableau 4).

Enfin, il est important à la fin de notre étude de définir les capacités et limites d'utilisation du modèle, pour les futurs utilisateurs. Ce bilan va servir pour déterminer le cadre d'utilisation. Dans notre cas, il était défini pour des parcelles non-irriguées, non-enherbées, sans forte pente, avec le feuillage palissé.

Conclusion

La méthode de paramétrage du modèle ici proposée et testée s'avère très satisfaisante, car elle permet d'une part, l'estimation des différents paramètres, et d'autre part une meilleure compréhension du modèle. Néanmoins, le jeu de données nécessaire pour le paramétrage du modèle reste très important et difficile à mettre en œuvre. La quantité de mesures à réaliser peut devenir trop importante en fonction du type de taille et le coût en main d'œuvre peut devenir trop élevé. Les résultats obtenus dans ce travail, sont décrits de manière plus exhaustive dans Garcia de Cortázar Aauri (2006).

- Brisson N. *et al.*, (2002) STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and corn. *Agronomie*. 22: 69-93.
- Brisson N. *et al.* (2003) An overview of the crop model STICS. *Eur. J. of Agr.* 18: 309-332.
- Dorsainvil F. (2002) - Evaluation par modélisation, de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de cultures. Thèse INRA/ INA-PG. 140pp.
- Flenet F. *et al.* (2005) Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). *Agronomie*. 24: 367-381.
- García de Cortázar Aauri I. (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie de Montpellier. 347p
- Gary C., Brisson N., Gaudillere J.P., Duarte M., 2003. Modélisation d'une espèce ligneuse pérenne à fruits charnus: la vigne. *Séminaire STICS, Arles (janvier 2003)*. 36-37.
- Launay M., Flenet F., Ruget F., Garcia de Cortazar Aauri I., (2005) Généricité et méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. 55-57.
- Makowski D. *et al.* (2006) Parameter estimation for crop models. In *Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. Wallach D., Makowski D., Jones, J., Eds. 462p
- Payan J.C. *et al.* (2005) Assimilation des caractéristiques du système sol-racines par simulation du potentiel de base en parcelle viticole. *Séminaire STICS, Carry-le-Rouet (mars 2005)*. 58-62p.
- Ruget F. *et al.* (2002). Sensitivity analysis of a crop simulation (STICS) in order to determine accuracy needed for parameters. *Agronomie*. 22: 133-158.

	Rendement Frais	Teneur en eau (%)	Rendement Sec	Nb Fruits/m ²
RMSE	4.69	2.79	0.93	413.00
RRMSE	0.34	3.58	0.32	0.59
RMSEs	0.51	1.82	3.13	128.00
RMSEu	0.77	2.12	3.50	393.00
MD	0.00	1.76	1.40	-125.00
Moyenne	13.80	78.10	2.88	703.33

	Debourrement	Floraison	Véraison	Récolte
RMSE	14.61	6.97	8.43	18.56
RRMSE	0.15	0.04	0.04	0.07
RMSEs	5.09	2.97	2.20	13.02
RMSEu	13.69	6.30	8.14	13.86
MD	-3.55	0.45	-0.01	0.03

Tableau 4 : Résultats des différents critères statistiques appliqués aux différentes variables étudiées dans la validation du modèle.

SIMULER LES VARIATIONS D'ETAT DE NUTRITION AZOTE DE PRAIRIES TEMPORAIRES SUBISSANT UN DEFICIT HYDRIQUE

JL. Durand^{1*}, N. Brisson², V. González Dugo³, JR. Carlón Gómez⁴, F. Gastal¹

¹INRA, BP6, F-86 600 Lusignan

²INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex 9

³ Instituto de Agricultura Sostenible – CSIC. Alameda del Obispo, s/n. 14080 Córdoba, Espagne.

⁴ Avenida de Salamanca, 8 47009 Valladolid, Espagne

jldurand@lusignan.inra.fr

Introduction

La simulation des variations de l'indice de nutrition azoté (I_{NN}) au cours de déficits hydriques est une nécessité car les stress azoté et hydrique interviennent fréquemment ensemble, d'autant que le second provoque parfois le premier. Il est avéré expérimentalement que les modifications de l'état de nutrition azoté par le déficit hydrique se produisent rapidement. Il est fréquent d'observer une rapide amélioration de l'état de nutrition azotée lors de la levée d'une contrainte hydrique. L'INN est le rapport entre la masse d'azote dans la végétation et la masse critique que cette végétation est susceptible de contenir. Or, il est apparu que l' I_{NN} simulé par STICS réagissait avec une inertie trop forte et que les phases de récupérations étaient trop lentes, aboutissant à une mauvaise évaluation de la croissance subséquente. Ceci a été observé chez le blé d'hiver, au sortir d'un printemps sec. La solution adoptée (Mary et Guérif, 2005) a été d'introduire un autre critère qui est le rapport entre le prélèvement d'azote journalier et le prélèvement potentiel défini par la biomasse du peuplement. Cet indicateur est évidemment hautement réactif et semble refléter davantage les capacités de la culture à réagir vite aux changements d'état. Elle soulève cependant des questions de physiologie encore mal explicitées dans le cadre de STICS. Nous avons cherché à comparer les deux approches dans le cas de plantes fourragères, cultures systématiquement soumises au déficit hydrique estival et dont la nutrition azotée est cruciale pour le niveau de production et la qualité de l'herbe récoltée.

Matériels et méthodes

Théorie

Pour les cultures fourragères, l'indice de nutrition azoté a été défini comme le rapport entre la teneur en azote de la matière sèche récoltable, essentiellement constituée de feuilles et de tiges ayant poussé après la coupe précédente, et la teneur en azote critique (N_c).

$$I_{NN} = \frac{N}{N_c} \quad (1)$$

Cette teneur en azote critique, qui est la teneur minimum d'une culture dont la croissance est maximum, est définie pour la fétuque élevée et les autres graminées en fonction de la biomasse récoltable (M_a) selon la relation (2) :

$$N_c = 4.8 * M_a^{-0.36} \quad (2)$$

Mary et Guérif (2005) ont dérivé de ces relations un indice de nutrition azoté instantané (I_{NNS}) qui se calcule selon la relation (3).

$$I_{NNS} = \frac{\left(\frac{dN}{dM_a}\right)}{\left(\frac{dN}{dM_a}\right)_{\max}} \quad (3)$$

Dans STICS, les variables intermédiaires permettant de calculer I_{NNS} sont calculées à chaque pas de temps (jour) et permettent de définir des fonctions de stress azoté sur la croissance de l'indice foliaire et la photosynthèse de la même façon que dans la version initiale de STICS en remplaçant I_{NN} par I_{NNS} . Dans ce travail, la version 6 de STICS a été utilisée.

Données expérimentales

Une expérimentation a été mise en place en 2003 pour étudier les variations d'indice de nutrition en fonction des niveaux de contrainte hydrique (humidité du sol et potentiel hydrique de base). L'ensemble des données est présenté dans Gonzalez Dugo *et al.* (2005). Brièvement, la fertilisation au printemps (mai) a été modérée afin de créer au début de la repousse étudiée (de mi-juin à mi juillet), un I_{NN} nettement inférieur à 1. Les parcelles en sec étaient couvertes de film de polyéthylène pour éviter les précipitations et les parcelles irriguées recevaient l'eau à hauteur de l'ETP. Deux niveaux de fertilisation ont été utilisés par apport de 40 ou 160 Kg N Ha⁻¹ suivi d'une irrigation de 20 mm permettant à l'engrais solide de se dissoudre et de pénétrer les premiers centimètres du profil. Le sol dit *des terres rouges à châtaigner*, consiste en un limon argileux d'environ 0.8 à 1 mètre d'épaisseur sur une argile rouge fracturée dans laquelle les racines peuvent s'étendre sur une grande profondeur (1.80 m au moins). Les données climatiques ont été obtenues sur la station météorologique du réseau *agroclim* sauf les précipitations recueillies avec un pluviomètre situé au voisinage de la parcelle étudiée. Au cours de la repousse, durant laquelle un cycle de dessèchement puis réhydratation a été contrôlé, des mesures de teneur en azote du sol, de la biomasse et densité racinaires, ainsi que de la végétation ont été réalisées. Des tubes d'accès de sonde à neutron ont permis de suivre l'humidité volumique du sol. L'indice foliaire a été suivi à l'aide d'un LAI Meter (LAI 2000, LiCor). Comme nous voulons suivre les variations journalières d' I_{NN} nous avons utilisé l'approche de Faruggia et al (2004) qui ont montré que l' I_{NN} est linéairement corrélé à la teneur en azote des feuilles éclairées. Cette mesure peut être répétée chaque jour et ne requiert pas la mesure de la biomasse.

Pour les simulations, STICS féтуque a été renseigné pour les différents paramètres obtenus sur le sol de Lusignan. De premières simulations faisaient apparaître un déficit azoté initial élevé interprété comme une impossibilité de prendre en compte la remobilisation depuis les réserves azotées de la biomasse racinaire (compartiment non défini dans STICS). La fraction de biomasse restant sur la parcelle après la récolte a été réduite d'une proportion fixée de litière (feuille et racine) avec la même composition en azote que la biomasse, et qui est entrée dans la matière organique du sol afin d'alimenter les flux de minéralisation. Cela permet de simuler le recyclage de l'azote de la plante, directement à travers la remobilisation depuis les racines mortes vers les parties aériennes, ou *via* la minéralisation de la matière organique fraîche.

Résultats

Dans les parcelles non irriguées, la croissance aérienne de la féтуque durant la repousse étudiée a été faible, du fait d'un déficit hydrique très marqué. De sorte que la demande en azote a été également très réduite. Parallèlement, l'offre d'azote par le flux à la racine de la solution du sol dans les horizons de surfaces, très secs, a été limité. Ainsi l'INN est passé de 0.7 environ à des valeurs inférieures à 0.5 dans les parcelles à faible apport d'azote. En irrigué, et de façon moins attendue, après une élévation de l'INN jusqu'à des valeurs voisines de 1, on a observé une chute continue qui a coïncidé avec une diminution de la teneur en azote minéral, et cela même lorsqu'un apport de 140 Kg N ha⁻¹ avait été fait. Les INN ont varié très fortement également avec la disponibilité en eau, une averse ou une irrigation étant suivis d'augmentations rapides des valeurs d'INN. (Gonzalez et al 2005)

Lorsque les valeurs de teneur en azote minéral et de flux d'eau à la racine des différents horizons mesurés sur le terrain sont introduits en variable d'entrée, le module de mouvement d'azote vers les racines a prédit correctement les quantités d'azote absorbées, telles qu'elles ont été mesurées par bilan sur la biomasse aérienne et racinaire. Ainsi la limitation de l'absorption d'azote a bien été simulée par STICS dans toutes les conditions expérimentales observées dans l'expérimentation.

L' I_{NN} simulé par STICS indiquait toutefois une très forte stabilité ou une lente augmentation à la suite de l'apport d'engrais et d'eau après la coupe (Figure 1). Dans les périodes suivantes, et dans tous les cas, l'effet de l'apport d'engrais induit une lente évolution de l' I_{NN} simulé, sans que la période d'épuisement de l'azote du sol ou le déficit hydrique ne réduise ultérieurement l' I_{NN} . L' I_{NNS} simulé au contraire a montré des variations rapides de même amplitude que celles mesurées.

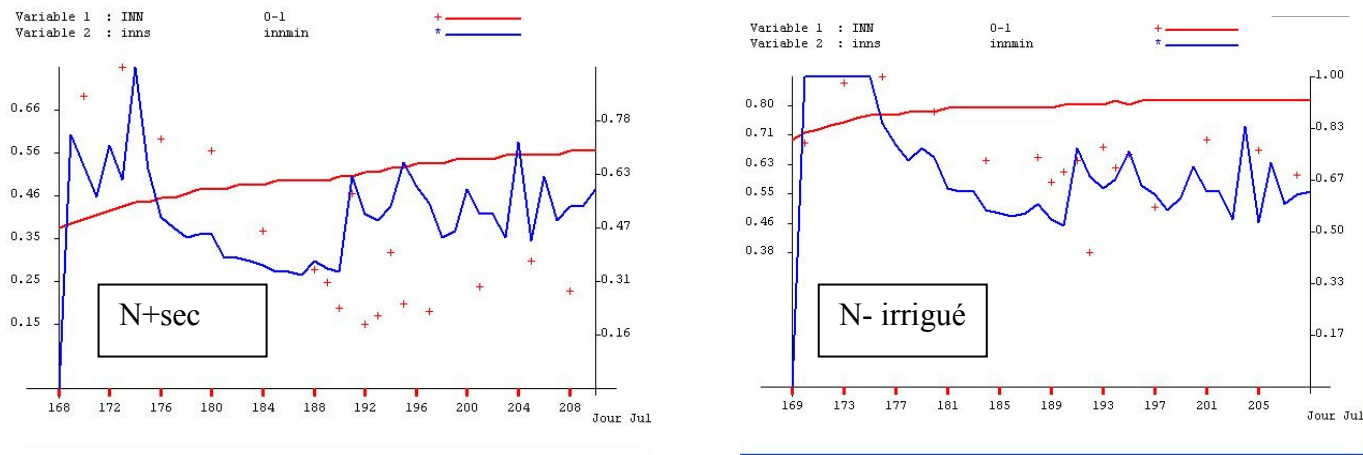


Figure 1 : Variations de l' I_{NN} mesuré (+ rouge) et simulé (ligne rouge) et de l' I_{NNS} (courbe bleue, axes de droite) dans deux parcelles expérimentales (à gauche, à fort azote et en sec, à droite, à faible apport d'azote et en irrigué).

Discussion

Bien que l' I_{NN} soit un rapport de deux variables d'état et que l' I_{NNS} soit dérivé de variables de flux, c'est le second qui semble représenter le mieux l' I_{NN} mesuré. La raison en est peut être dans la relativement faible contribution des nouveaux tissus formés par rapport à la biomasse prise en compte dans le calcul de l' I_{NN} . Les compartiments considérés par STICS pour le calcul de la teneur en azote sont en effet l'ensemble des parties aériennes, y compris celles qui restent au champ après la coupe et assurent la repousse. Ces chaumes contiennent une grande quantité d'azote. L' I_{NN} correspondant à l'équation (1) est calculé, lui, à partir de la seule biomasse récoltable, c'est-à-dire sans les chaumes. Il est donc normal que lorsque la culture ne repousse que très peu, l' I_{NN} soit surestimé par STICS. Il est plus surprenant que l' I_{NNS} suive aussi bien les variations mesurées d' I_{NN} . Cela suggère que, toujours dans ce cas particulier de repousses relativement faibles, la partie qui apparaît au dessus du niveau de la coupe et dont la teneur en azote est utilisée pour mesurer l' I_{NN} est bien reflétée par les entrées d'azote quotidiennes (qui déterminent l' I_{NNS}). Pour traiter complètement les questions émergeant de ces éléments, il conviendrait de modifier la structure de la plante simulée dans STICS pour séparer un compartiment récoltable d'un compartiment réserve (pouvant ou non contenir une part des racines) qui est le compartiment défini dans l'état initial du système. Des résultats obtenus sur luzerne (Durand *et al.*, 1989) donnent des pistes pour la gestion de la biomasse de ce compartiment réserve. En revanche, pour simuler correctement les remobilisations d'azote, l'algorithme permettant d'échanger l'azote entre les compartiments après une coupe reste à élaborer.

Références

- Durand J.L., Lemaire G., Gosse G., Chartier M., (1989) Analyse de la conversion de l'énergie solaire interceptée par un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.) soumis à un déficit hydrique. *Agronomie*, 9(6): 599-607
- Farruggia A., Gastal F., Scholefield D., 2004. Assessment of the nitrogen status of grassland. *Grass and Forage Science*, 59 (2): 113-120
- Gonzalez Dugo V., Durand J.L., Gastal F., Picon-Cochard C., (2005) Short term response of the nitrogen nutrition status of tall fescue and Italian ryegrass swards under water deficits. *Australian Journal of Agricultural research*, 56: 1269-1276.
- Mary B, Guéris M, (2005) Effet du stress azoté sur la plante: Définition d'un indice de nutrition instantané. Séminaire Stics. Carry-le-Rouet 17-18 mars. 23-27.

DYNAMIQUES DE LA MATURATION DU RAISIN (*Vitis vinifera* L.)

DYNAMICS OF GRAPE BERRIES GROWTH (*Vitis vinifera* L.)

García de Cortázar Aauri I.^{1*}, Brisson N.¹, Jacquet O.², Payan J.C.³

¹ Unité Agroclim, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914, Avignon cedex 9

² Chambre d'Agriculture Vaucluse, 2260, Route de Grès F- 84100 Orange, ³ ITV-France – Unité de Nîmes, Domaine Donadille, F-30230, Rodilhan
igarcia@avignon.inra.fr

Introduction

Dans le domaine de la viticulture, la notion de maturité n'est pas univoque car le produit final recherché n'est pas le même dans tous les vignobles. Pour bien appréhender la maturité du raisin, il faut bien comprendre les différentes phases et processus qui la définissent. Ainsi, nous savons que la croissance des baies de raisin suit une double sigmoïde qui est divisée en trois phases (Coombe and McCarthy, 2000) : la phase I est une phase de multiplication et d'élongation cellulaire tandis que la phase III est une phase d'élongation cellulaire uniquement, la phase II étant une phase intermédiaire de ralentissement des divisions avant que ne commence l'élongation. Ces phases se déroulent pendant la période floraison - maturité, et le stade véraison joue un rôle important comme indicateur dans la dynamique de croissance de la baie ainsi définie. Les phases I et II se produisent avant la véraison. Pendant cette période la concurrence trophique entre les feuilles et les fruits est la plus forte, jouant un rôle déterminant sur le poids final des baies (Ollat, 1997). Parallèlement à la croissance des baies (en matière fraîche), on observe une diminution de leur teneur en eau (% d'eau) depuis la nouaison. La phase III de la croissance de la baie s'étend de la véraison à la récolte et commence par le changement de couleur de la baie (à la véraison). L'impact du stress hydrique post-véraison sur le poids frais final des baies n'est pas clairement défini. A tous ces éléments, il faut ajouter le caractère non synchrone de la maturité des différentes baies au sein de la grappe ou du cep. L'objectif du travail est de décrire et comprendre les processus déterminant la maturation des baies de raisin : croissance, développement, évolution de la teneur en eau, asynchronisme (Garcia de Cortazar Aauri, 2006).

Matériel & Méthodes

L'expérimentation a été réalisée de 2003 à 2005 sur plusieurs cépages dans les vignobles de la Vallée du Rhône: *Vitis vinifera* L. cultivars "Grenache N", "Syrah" (Table 1), dans les parcelles expérimentales de Piolenc (CA 84) et Serres (Exploitation Saint Victor). Les données climatiques proviennent d'une station météorologique automatique (normes OMM) présente sur les parcelles.

	Période 1990 - 2002	Température journalière (°C)			Pluies (mm)
		Moyenne	Minimale	Maximale	Cumul (mm)
Côtes du Rhône (Station Météorologique d'Avignon) 43°55', 4°50'	2003	18.8 ± 0.4	13.3 ± 0.4	25.0 ± 0.4	498 ± 118.4
	2004	20.5	14.4	27.5	361
	2005	19.4	13.6	25.9	312
	2005	19.5	14.1	25.8	407

Table 1 : Conditions climatiques moyennes. Comparaison entre les conditions moyennes de la période 1990-2002 (Avril-Octobre).

En ce qui concerne le parcours phénologique de la baie, on a identifié trois stades : floraison, véraison et maturité (50% des fleurs ou baies ayant atteint le stade). Pour caractériser l'état de maturation des baies, nous avons utilisé une technique, inspirée de Singleton (1966), qui permet de séparer les baies en fonction de leur densité. On constitue ainsi des groupes de baies de densité équivalente en les plongeant dans des solutions salines de concentration croissante, le tri s'effectuant par la flottabilité des baies propre à leur stade de maturité. L'échantillonnage était constitué de 12 grappes par parcelle, prélevées une fois par semaine entre la véraison et la récolte (le matin) sur 12 plantes différentes à chaque prélèvement. Les baies sont équeutées en sectionnant le pédicelle au-dessus du bourrelet, de façon à limiter les effets d'osmose entre la baie et le milieu salin. Un travail préliminaire avait permis de mettre au point l'échelle de salinité appropriée à la gamme de concentration en sucre du raisin selon 10 classes, interprétées comme des "classes d'âge" (Table 2) puisque chaque baie passe par chacune des classes dans son parcours depuis la véraison jusqu'à la maturité. Une fois classées, les baies ont été comptées, pesées puis séchées pendant 120 heures dans une étuve à 70 °C avant d'être pesées à nouveau.

Classe d'Âge	Concentration de sel
CA1	< 60gr/l
CA2	60 – 75gr/l
CA3	75 – 90gr/l
CA4	90 – 105gr/l
CA5	105 – 120gr/l
CA6	120 – 135gr/l
CA7	135 – 150gr/l
CA8	150 – 165gr/l
CA9	165 – 180gr/l
CA10	> 180gr/l

Table 2 : Concentrations de sel des différentes solutions salines.

Juste avant le séchage, sur un sous-échantillon de 10 baies prises au hasard dans chaque classe, nous avons mesuré le % Brix (à définir peut-être). Afin de cerner le début de la dynamique, nous avons réalisé en 2005 quatre échantillons supplémentaires (de 200 baies chacun) entre la floraison et la véraison sur lesquels ont été mesurés les poids frais et secs.

L'échelle temporelle retenue est une somme de température (Growing Degree Days – G_{DD}) à partir de la floraison.

L'évolution de la teneur en eau des baies a été mise en relation avec la température de culture, estimée à l'échelle journalière avec le modèle de culture STICS 6.0 (Brisson *et al.*, 2003) en mode "forçage" de l'indice foliaire, les paramètres caractérisant le fonctionnement hydrique des sols ayant été soigneusement mesurés. Un bilan d'énergie est réalisé utilisant les variables climatiques mesurées, l'évapotranspiration calculée et la structure de la végétation décrite. Ainsi la température de culture est une synthèse de l'état hydrique de la plante, du taux de couverture du sol et du climat.

Résultats et Discussion

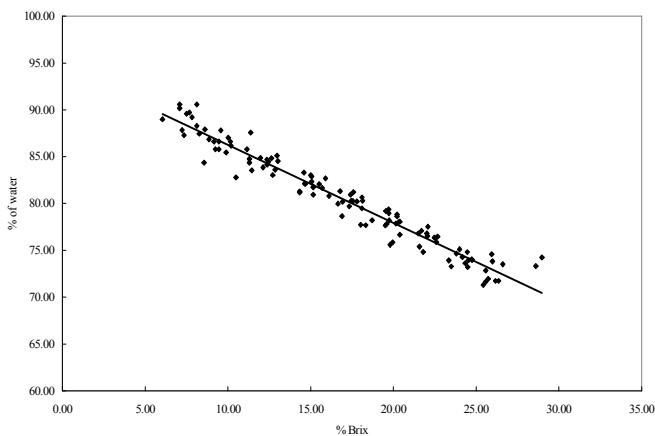


Fig. 1 : Relation entre le % Brix et la teneur en eau des baies. Le coefficient de régression est calculé avec tous les données de toutes les variétés et expérimentations Coefficient de régression est $R^2 = 0.95$

Un des premiers résultats obtenus avec ce travail est la bonne régression linéaire entre la teneur en eau de la baie et le % Brix (Figure 1) sur l'ensemble de la gamme de maturité et avec une indépendance entre variétés, de sorte que l'on peut proposer la relation suivante ($R^2 = 0.95$) :

$$W_c = -0.8408 * C_s + 94.712$$

où W_c est la teneur en eau d'une baie (% d'eau) et C_s est le % Brix de la baie. Cette relation donne accès simplement, par la mesure du % Brix, au poids sec des baies à partir du poids frais.

Les résultats obtenus en terme de dynamique de la population des baies (Figure 2) confirment ceux de Singleton (1966) c'est-à-dire qu'à une date donnée, on trouve des baies de plusieurs "classes d'âge", confirmant que la population de baies a une maturation asynchrone.

En nous appuyant sur les résultats précédents, pour suivre la dynamique d'une baie, nous avons choisi de suivre la classe d'âge majoritaire en terme à la fois de biomasse sèche et de teneur en eau (sites "Serres" : parcelles SS03, SI03, SGr04, SGr05, SSy04, SSy05; et "Piolenc": parcelles PGr04, PGr05, PSy04, PSy05).

En ce qui concerne le parcours phénologique de la baie, les quatre stades identifiés (floraison, nouaison, véraison et maturité) ont été traduits en G_{DD} (définir ?) et résumés dans le tableau 3 pour les deux variétés "Grenache N" et "Syrah". Cela confirme le caractère variétal du développement (García de Cortázar Atauri, 2006).

La dynamique d'évolution de la matière sèche de la baie (Figure 3A) est importante après la véraison, puis semble atteindre un plateau en fin de croissance. Si on normalise les axes par le maximum des sommes de température pour les abscisses et des poids secs pour les ordonnées,

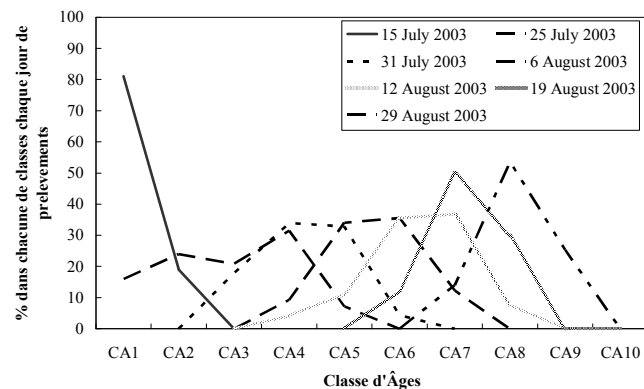


Fig. 2 : Exemple d'évolution des classes d'âges dans SI03.

nous observons un regroupement des points de mesure qui peut être représenté par une seule et unique courbe. La normalisation des abscisses dépend uniquement du cépage : il s'agit de la durée thermique de la maturation : 1534 G_{DD} pour "Grenache N" et 1477 G_{DD} pour "Syrah".

Cumul de Températures moyennes (base 10°C)	Grenache Noir		Syrah
	Mean	Std. Dev.	CV
Floraison – Nouaison	Mean	133.39 a	131.81 b
	Std. Dev.	12.35	8.98
	CV	0.09	0.07
Nouaison- Véraison	Mean	760.86 a	616.58 b
	Std. Dev.	49.56	29.97
	CV	0.07	0.05
Véraison - Recolte	Mean	548.32 a	581.76 b
	Std. Dev.	73.67	98.08
	CV	0.13	0.17
Floraison - Recolte	Mean	1446.86 a	1338.35 b
	Std. Dev.	106.66	121.25
	CV	0.07	0.09

Tableau 3 : Valeurs des cumuls de températures obtenus pour les différentes périodes. Le test de Fischer a permis de comparer les deux cépages. Les différences sont toujours significatives (95%) (lettres différentes).

$$M_{dn} = E_{mg} \left(1 - e^{-E_c (G_{DDn} - 0.1)} \right) + \frac{A_{fx}}{1 + e^{-L_c (G_{DDn} - L_{mg})}} + B_{fx}$$

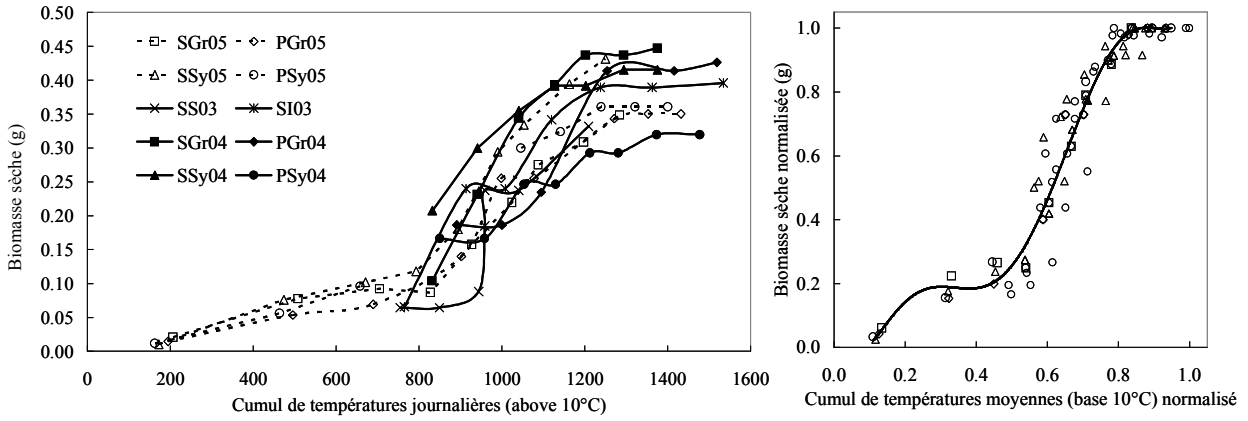


Fig. 3A : Description de la courbe de la matière sèche depuis la floraison en fonction de la somme de G_{DD} . **3B** Normalisation des différentes courbes et estimation de la courbe qui décrit la dynamique

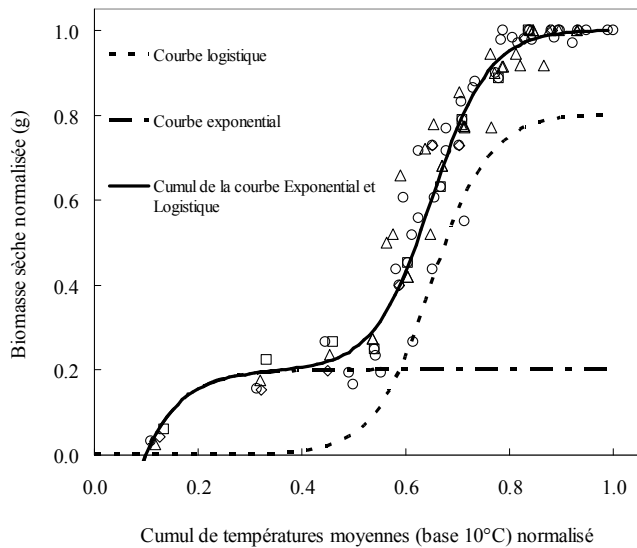


Fig. 4 : Schéma de l'évolution de la normalisation de l'évolution de la biomasse sèche d'une baie en fonction du cumul de G_{DD} . Description de la courbe exponentielle (multiplication cellulaire) et de la courbe logistique (grossissement et élongation cellulaire).

La normalisation des ordonnées se justifie par les résultats de plusieurs auteurs (McCarthy, 1997; Ollat, 1997; Ojeda *et al.*, 2001) selon lesquels le poids maximal d'une baie, dépendant à la fois du potentiel génétique et des conditions pédoclimatiques, serait déterminé à la véraison. La Figure 3B met clairement en évidence le double sigmoïde mentionné dans la littérature mais cette fois en matière sèche. La véraison correspond au moment où la vitesse de croissance est maximale, c'est une autre définition de la véraison déjà observée auparavant (Coombe et McCarthy, 2000). Pour décrire cette évolution, nous avons défini deux dynamiques qui s'ajoutent : (1) une dynamique qui décrit la multiplication cellulaire (décrite par une courbe exponentielle) et (2) une dynamique qui décrit le grandissement des cellules (définie par une courbe logistique) (Figure 4). Le cumul de ces deux courbes va nous permettre d'obtenir le double sigmoïde défini auparavant. L'équation théorique normalisée (en fonction du développement et de la biomasse sèche) est la suivante :

où M_{dn} est la valeur normalisée du poids sec (g) ; G_{DDn} est la somme de températures depuis la véraison ; L_c et L_{mg} sont la courbure et le point de croissance maximale en biomasse de la logistique ; E_c et E_{mg} sont la courbure et le point de croissance maximale en biomasse de l'exponentielle ; et A_{fx} et B_{fx} sont les coefficients qui permettent la normalisation (équations 4 and 5).

$$A_{fx} = \frac{(1 - E_{mg} (1 - e^{-E_c}))}{1 + e^{-L_c (1 - L_{mg})} - \frac{1}{1 + e^{L_c L_{mg}}}} \quad (4)$$

$$B_{fx} = -\frac{A_{fx}}{1 + e^{L_c L_{mg}}} \quad (5)$$

Un ajustement non linéaire de ces équations sur les données issues de nos expérimentations a permis d'estimer les valeurs des paramètres L_c (15), L_{mg} (0.2), E_c (18) et E_{mg} (0.65).

Par ailleurs, le poids sec final de la baie est prédéterminé à la véraison, et donc la relation établie dans la figure 3B pourrait être utilisée comme outil prédictif, en s'appuyant sur le poids de la baie à la véraison qui est de l'ordre de 40% du poids sec final. Le poids sec final de la baie serait atteint avant la maturité (80% du parcours floraison-maturité). Au delà de cette date les fluctuations du poids frais de la baie sont surtout dues aux variations de sa teneur en eau. Le plateau montré dans la figure 4 représente le stade de "maturité physiologique" (MAT) calculé dans STICS.

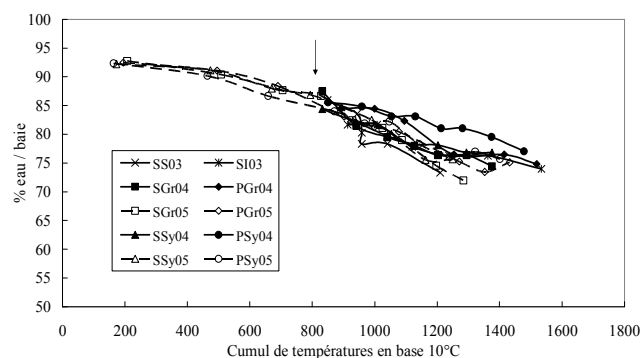


Fig. 5 : Evolution de la teneur en eau d'une baie en fonction du cumul de températures (base 10°C).

La dynamique de la quantité d'eau dans la baie semble plus erratique que celle de la matière sèche, avec une forte dépendance due à la fois au cépage et aux conditions pédoclimatiques de la parcelle. Si l'on exprime l'eau en teneur (Figure 5), l'évolution est plus monotone, débutant clairement à la nouaison, comme l'avaient mentionné Matthews and Anderson (1988). Nous avons testé le formalisme déjà présent dans le modèle STICS qui permet de décomposer cette évolution en deux composantes dont l'une serait liée à l'âge de la baie et l'autre dépendrait des conditions d'alimentation hydrique de la plante (Figure 6). La bonne relation entre la teneur en eau et le degré Brix a permis d'utiliser la première comme critère de récolte pour la vigne. Les résultats obtenus dans Garcia de Cortázar Aauri (2006) montrent que le formalisme représente bien l'évolution de la teneur en eau du raisin.

La bonne relation entre la teneur en eau et le degré Brix a permis d'utiliser la première comme critère de récolte pour la vigne. Les résultats obtenus dans Garcia de Cortázar Aauri (2006) montrent que le formalisme représente bien l'évolution de la teneur en eau du raisin.

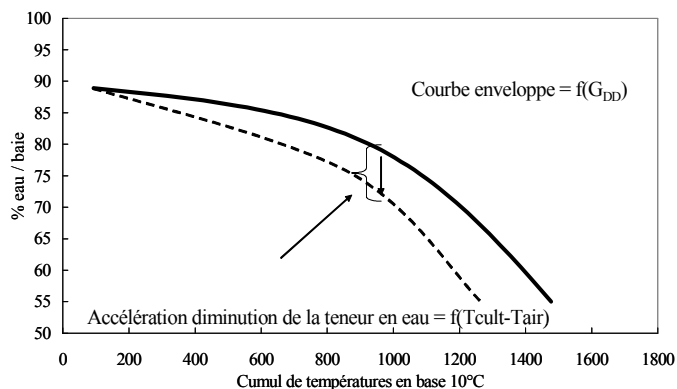


Fig. 6 : Comparaison de la teneur en eau simulée avec la teneur en eau observée. RMSE of 1.74%.

Conclusion

Ce travail a permis de dessiner un cadre conceptuel pour comprendre et représenter la dynamique de croissance d'une population de baies de raisin. Les différentes dynamiques ont été intégrées et testées dans le modèle STICS pour plusieurs cépages, à l'échelle de la France (García de Cortázar Aauri, 2006).

Références bibliographiques

- Brisson N. *et al.* (2003) An overview of the crop model STICS. *Eur. J. of Agr.* 18: 309-332.
- Coombe BG, McCarthy MG. (2000) Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Aust. J. of Grape Wine Res.* 6: 131-135
- García de Cortázar Aauri I. (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. *Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie de Montpellier* 347pp
- Ollat N. (1997) *Bases physiologiques et anatomiques de la croissance des baies de Vitis vinifera cv Cabernet Sauvignon*. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- Singleton VL., Ough CS. *et al.* (1966) Density Separations of Wine Grape Berries and Ripeness Distribution. *Ame. J. Eno Vit.* 17: 95-105

EVALUATION ET UTILISATION DU MODELE STICS POUR LA SIMULATION DE SYSTEMES DE CULTURES ASSOCIEES EN EUROPE

EVALUATING THE STICS CROP MODEL AND TESTING AGRONOMIC STRATEGIES FOR INTERCROPPING IN EUROPE

M. Launay*, N. Brisson, S. Satger, G. Corre-Hellou, A. Dibet, H. Hauggard-Nielsen, E. Kasyanova, M. Monti, C. Dahlmann

INRA, Unité Agroclim, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.

*mlaunay@avignon.inra.fr

Introduction

Given the complexity of intercropping systems, models can be especially helpful to analyse them comprehensively and to test agronomic strategies. Hence a special issue was devoted to modelling in the INTERCROP FP5 EU project which aimed at promoting pea-barley intercrop as a relevant cropping system for organic farming throughout several European countries (Denmark, France, England, Germany and Italy). The first phase of the work consisted in setting up the STICS crop model (Brisson *et al.*, 2002) from a first intercrop version (Brisson *et al.*, 2004) and ecophysiological experiments conducted in conventional conditions in Angers, France (Corre-Hellou and Crozat, 2004). During this first phase a few new physiological concepts were introduced in the model and a thoroughly parameterization of both species was performed on sole crop trials (Corre-Hellou *et al.*, 2007). This paper focuses on the second phase, devoted to the evaluation and utilization of the STICS intercrop/sole crop model taking into account the European environmental variability within an organic farming framework.

Analysis of the model agronomic results

The model ability to simulate intercropping systems was evaluated on the network of the INTERCROP experiments. The agronomic and physical framework consisted in 9 pedoclimatic situations spread over Europe. For each sites, three cropping systems were studied: sole crop of pea (100% pea), sole crop of barley (100% barley), additive pea-barley intercrop (100% pea and 50% barley), and replacement pea-barley intercrop (50% pea and 50% barley). The model evaluation on sole crops showed its tendency to underestimate pea key variables in strong conditions of water stress. In the case of barley most of the discrepancies between simulations and measurements were attributed to the non accounting of biotic stresses. The evaluation of the model performance on intercrops showed the same difficulty as for sole crops to simulate relevant absolute production values, even if the modelling work dedicated to the development of an intercrop model from a sole crop model has no bias. In spite of those rather pessimistic conclusions on the ability of the model to simulate correct absolute values, the relative values and in particular the Land Equivalent Ratios draw to the same results for simulation and observation, i.e. the global advantage of intercropping compared to sole crops (Fig. 1).

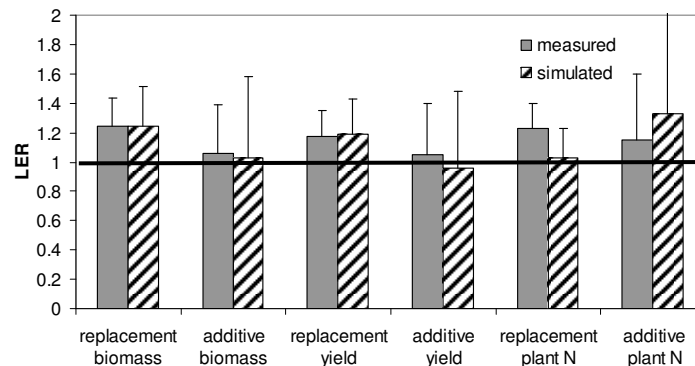


Figure 1 : Comparison of measured and simulated LER for aboveground biomass ($g \cdot m^{-2}$), yield ($g \cdot m^{-2}$) and plant nitrogen content ($g \cdot m^{-2}$) throughout the years and locations. Values are the mean ($n=8$) \pm S.E. (— LER=1).

For this reason, the model was considered as an efficient tool to investigate various technical intercrop strategies.

Use of the model to test agronomic strategies

In order to reach some generality of the responses through statistical analysis, we used climatic series of around 10 years, on the French, the English and the Danish sites. To illustrate this approach, we detail in this paper the two following questions addressed to the model: What are the interests in terms of quantity, quality and stability of pea-barley intercrops compared to sole crops? Which is the most relevant criterion between density and proportion of each species in the mixture to sort the best pea-barley design in term of yield and nitrogen use efficiency ?

To answer the first question, we realized the four types of simulations corresponding to the INTERCROP project experimental design but over the climatic series. In order to estimate the stability of intercropping we calculated the coefficient of variation of the produced biomass over the climatic series. The results (Table 1) showed a decrease in the production stability at the species level (except for barley in France and in Denmark) while it is clearly an improvement at the crop level as if the intercrop system allows compensation in the specific reaction to the year to year climatic variability.

Coefficient of variation	Sole pea	Additive pea	Replacement pea	Sole barley	Additive barley	Replacement barley	Additive intercrop	Replacement intercrop
France	0.24	0.42	0.42	0.20	0.18	0.18	0.21	0.21
England	0.15	0.25	0.21	0.09	0.19	0.16	0.14	0.12
Denmark	0.11	0.34	0.29	0.18	0.17	0.18	0.08	0.10

Table 1 : Biomass over year statistics.

To answer the second question, two combinations holding 1/3 pea + 2/3 barley (Bp) and 2/3 pea + 1/3 barley (Pb) were tested at three different density levels, relative to the recommended density of the two sole crops (90 and 300 plants m⁻² for pea and barley, respectively), half and double of the recommended sole crop densities (Fig.2) (from Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2006).

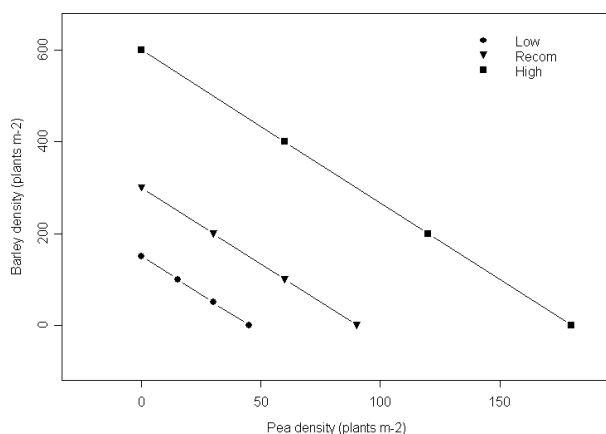


Figure 2 : Plant density (plants m⁻²) in sole crops and two intercrop combinations (Bp and Pb) of pea and barley.

The simulation results showed that the total grain yield remained unchanged between the Bp and the Pb combinations thanks to the compensation between the two species according to the carbon use efficiency. While density had no significant effect on crop production or nitrogen uptake, relative frequency appeared as a relevant driver factor for choosing pea-barley design according to the nitrogen use efficiency of the cropping system (Fig. 3).

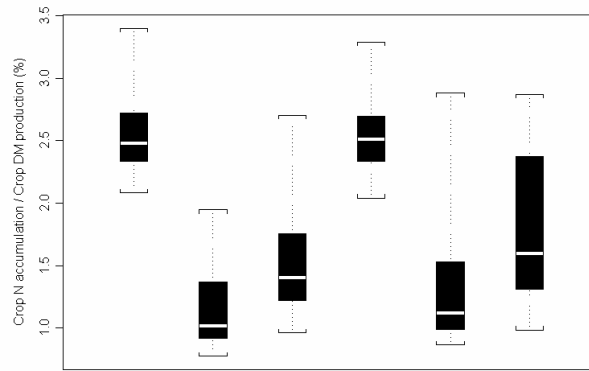


Figure 3 : Box plots of nitrogen use efficiency measured as the ratio between the final total crop N accumulation ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) on the final total aboveground crop dry matter ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), given for pea, barley and total production in Bp and Pb intercrop combinations. The lower and upper values of the boxes correspond to the first and third quartile, while the white bold bar represents the median. Minimum and maximum values are also reported (dotted lines). 87 values are reported in each boxplot.

Discussion and conclusion

The evaluation of the STICS intercrop/sole crop model within the INTERCROP EU project, showed that, if we can consider the model to be well adapted to intercrop simulation, it is not the case for organic farming in the sense that it does not account for biotic stresses (weeds and diseases). Consequently, this modelling study could not be considered a validation of the model knowing that the conditions of simulation are different from the actual condition of growing within the organic intercropping network of the project. However, the relative values drew to the same results for simulation and observation, i.e. the global advantage of intercropping compared to sole crops. The use of the model to test agronomic strategies, on different pedoclimatic situations, showed that the strategies to get the best agricultural results can be different according to locations and output objectives: pea or barley, grain or forage utilisation.

References

- Brisson N. et al. (2003) An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18: 309-332.
- Brisson N. et al. (2004) Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie* 24: 409-421.
- Corre-Hellou G and Crozat Y. (2004) Interspecific competition for soil N in pea-barley mixtures during the vegetative phase and consequences of N_2 fixation. In: AEP (Ed.), *Proceedings of the 5th European Conference on Grain Legumes, Dijon, France*, June 7-11, pp. 65-66.
- Corre-Hellou G. et al. (2007) Effect of root depth penetration on soil N sharing and dry matter in pea-barley intercrops given different soil N supplies. *Field Crops Research*, accepted for publication.
- Hauggaard-Nielsen H. (2006) Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. *Field Crops Research* 95: 256-267.

QUELLES COMPOSANTES ENVIRONNEMENTALE ET GENETIQUE POUR L'ELABORATION DE LA QUALITE DU BLE DUR EN REGION PACA ?

WHAT ARE THE ENVIRONMENTAL AND GENETICAL COMPONENTS OF THE DURUM WHEAT QUALITY ONSET IN PACA REGION ?

**M. Launay, N. Brisson, V. Desfonds, S. Juin,
I. Garcia de Cortazar, S. Lebonvallet, D. Ripoche, G. Sappe, B. Bes**
INRA, Unité Agroclim, Domaine St Paul, Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex 9
mlaunay@avignon.inra.fr

Introduction

Le blé dur est devenu la première céréale cultivée en région PACA. Implanté dans des environnements difficiles, il joue un rôle de plus en plus important dans la diversification des surfaces agricoles. Dans ce contexte, la compréhension de l'élaboration de la qualité peut aider les agriculteurs à réaliser les bons choix techniques (variété et fertilisation) en fonction des contraintes de leur milieu pédoclimatique. L'objectif de notre travail était de séparer les composantes génétiques et environnementales de l'élaboration de la qualité dans ce contexte régional. Ce programme s'est appuyé sur la complémentarité entre approche expérimentale et modélisation.

Démarche

Expérimentations et analyse agronomique

D'une part, des essais régionaux ont été réalisés en parcelles d'agriculteurs durant les campagnes 2000-2001 (11 parcelles) et 2001-2002 (9 parcelles). L'objectif de ces essais était de décrire la variabilité intra-régionale des milieux de culture du blé dur, de déterminer la gamme variétale utilisée dans ces conditions, puis de valider l'adaptation du modèle STICS (Brisson et al., 2002) pour ces variétés. D'autre part, une expérimentation variétale a été conduite sur le site de l'INRA d'Avignon durant les campagnes 2001-2002 et 2002-2003, les variétés sélectionnées correspondant aux 7 variétés identifiées dans les essais régionaux l'année précédente (Artimon, Allur, Nefer, Lloyd, Arcalis, Acalou, Orjaune). Deux traitements relatifs à la disponibilité en eau ont été appliqués sur la parcelle. Cette expérimentation avait pour objet de mettre en évidence les fonctions écophysiologiques dont le paramétrage était sensible au génotype, et de fournir les données nécessaires à l'adaptation de STICS au blé dur et à son ajustement variétal. Sur les essais régionaux et sur l'expérimentation variétale, des mesures de développement et de croissance des plantes, de qualité des grains, de teneurs en eau et en azote du sol, ont été réalisées. Les mesures ont été plus exhaustives et fréquentes sur l'expérimentation variétale, et l'analyse agronomique de ces variables ou de leur dynamique (déterminée par des fonctions de réponse connues) a permis de distinguer le caractère génétique susceptible de s'exercer sur l'état potentiel ou l'évolution potentielle du couvert végétal.

Adaptation spécifique et génétique de STICS au blé dur

L'analyse agronomique de l'étape précédente a permis d'identifier les paramètres variétaux de STICS, dont les valeurs ont été estimées soit directement à l'aide des mesures de l'essai variétal, soit par des procédures mathématiques d'ajustement en mettant à profit les capacités de forçage du modèle (développement, LAI). Certains paramètres non variétaux ont été également réévalués à l'aide de ces mesures, en s'appuyant sur les précédents travaux réalisés sur le blé dur (Casals, 1996 ; Garcia de Cortazar, 2001 ; Lebonvallet, 2002 ; Brisson et Casals, 2005). Les qualités prédictives du modèle adapté ont ensuite été évaluées sur les variables caractérisant la croissance, le développement, l'élaboration du rendement et de la qualité (teneur en protéines des grains), mesurées sur les essais régionaux.

Etude des interactions génotype x environnement

Nous avons élaboré une base de données comprenant des situations pédoclimatiques régionales contrastées représentant différentes modalités du facteur « environnement », de façon à tester grâce au modèle de culture, l'interaction éventuelle entre variétés et environnement. Nous avons donc réalisé des simulations sur 9 sites parmi les 11 sites suivis lors des essais régionaux, pour lesquels nous disposons de

la caractérisation du sol des parcelles d'agriculteurs et des données climatiques de l'année 1995 à l'année 2002. Pour chaque site et chaque année climatique nous avons simulé le fonctionnement des 7 variétés paramétrées. Nous avons ensuite réalisé deux analyses de variance de type ANOVA à deux facteurs (variété et environnement) avec 7 répétitions (chaque année climatique représentant une répétition), l'une sur le rendement, l'autre sur la teneur en protéines des grains. Une analyse de covariance a ensuite permis de tester l'hypothèse selon laquelle rendement et qualité peuvent être négativement corrélés.

Analyse des corrélations entre les diverses composantes de la qualité du blé dur

En regroupant l'ensemble des analyses réalisées dans le cadre des deux expérimentations (172 échantillons), nous avons calculé une matrice des corrélations pour mettre en relation la variable d'intérêt simulée par le modèle, en l'occurrence la teneur en protéines, et les autres composantes de la qualité.

Résultats

Analyse agronomique des résultats de l'essai variétal à Avignon

Nous avons mis en évidence un effet variétal sur le développement phénologique mais également sur les manques à la levée, sur la croissance foliaire et plus particulièrement sur la vitesse de tallage, le nombre de talles et la vitesse de croissance foliaire, ainsi que sur l'élaboration du rendement et de la qualité (Tableau 1), et notamment l'accumulation de carbone et d'azote dans les grains (qui semblent aller dans le même sens, Fig. 2).

<i>Ecophysiologie de la culture</i>	<i>Variable</i>	<i>valeur moyenne (écart-type)</i>	<i>effet traitement*</i>	<i>effet variété*</i>
rendement	Grains /m²	17935 (5096)	0.0000	0.0000
	PMG (g)	35.4 (8.4)	0.0000	0.0000
	rendement (t/ha)	6.73 (2.19)	0.0000	0.0323
	indice de récolte	0.49 (0.06)	0.0000	0.0000
	protéines	14.2 (2.5)	0.0000	0.0000
azote	remobilisation épi 1 (kg/ha)	147 (45)	0.0000	0.2547
	remobilisations vers l'épi (kg/ha)	136 (50)	0.0692	0.0009
	remobilisations vers les racines (kg/ha)	40 (52)	0.1970	0.2042
	indice de récolte azoté	0.69 (0.07)	0.0062	0.0002
	absorption d'azote post floraison (kg/ha)	24 (46)	0.053	0.005
	dynamique de l'indice de récolte azoté (azote épi/azote total·10⁻⁴/degré·jour)	4.44 (0.69)	0.0000	0.0000
	dynamique de l'indice de récolte carboné (biomasse épi/biomasse totale·10⁻⁴/degré·jour)	3.81 (0.76)	0.0000	0.0000

Tableau 1 : Bilan des analyses de variance sur les variables relatives à l'élaboration du rendement et à la qualité (comportement azoté de la culture) () probabilité du test de Fisher avec en gras les valeurs inférieures à 0.05, pour lesquelles l'effet est suppose significatif.*

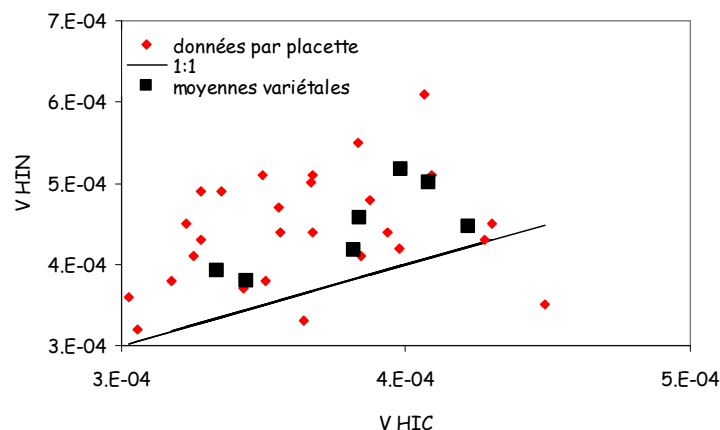


Figure 2 : Relation entre l'indice de récolte azoté (VHIN) et l'indice de récolte carboné (VHIC)

Ajustement des paramètres spécifiques et variétaux de STICS pour le blé dur

La démarche de calibration est explicitée dans le Tableau 2. Le paramétrage spécifique et variétal du modèle a ensuite été évalué sur l'ensemble des essais régionaux. Le Tableau 3 compare les performances du modèle obtenues avec le paramétrage initial à celle obtenues après adaptation variétale.

Etapes	Paramètres de STICS	Version de STICS	Variables cibles /observations	Nombre d'essais
1	paramètres blé dur (teopt, teoptbis, vmax2)	Forçage LAI et phénologie	MASEC et QNPLANTE pre-floraison	56
2	paramètres variétaux d'absorption post-floraison (inngrain1 et inngrain2)		QNPLANTE post-floraison	8 par variété
	paramètres variétaux d'élaboration du rendement et azote récolte (vitircarb, vitirazo, tmaxremp)	MAFRUIT et CNGRAIN	8 par variété	
3	paramètres variétaux de développement (JVC, sensiphot, stlevamf, stamflax)	Forçage de la levée	Stades	8 par variété
	paramètres de la levée	Sans forçage	levée	56
4	paramètre LAI (adens puis réestimation stamflax et durvieF)	Forçage levée	LAI	8 par variété

Tableau 2 : Etapes de l'estimation des paramètres « non mesurables » de STICS (LAI = indice foliaire, MASEC = biomasse aérienne, MAFRUIT = rendement, ZRAC = front racinaire, QNPLANTE = quantité d'azote dans la plante, CNGRAIN = teneur en azote des grains)

paramétrage	critère	LAI (m ² m ⁻²)	MASEC (t ha ⁻¹)	MAFRUIT (t ha ⁻¹)	NBFRUIT (nb ha ⁻¹)	QN PLANTE (kg ha ⁻¹)	PROTEINES (%)	RESMES (mm)	AZOMES (kgNha ⁻¹)
Moyenne des observations		1.96	7.89	5.98	14475	147.26	14.00	288	133
Initial	RMSE	1.50	3.41	3.71	4386	83.67	17.52	140.68	121.19
	Biais	0.80	1.27	3.04	170	55.37	-10.62	22.58	57.22
Variétal	RMSE	1.37	3.78	1.97	5065	75.77	4.48	131.22	123.81
	Biais	0.40	-0.02	1.16	-23	39.40	0.86	27.10	72.24

Tableau 3 : Statistiques d'évaluation du modèle avec le paramétrage initial et avec le paramétrage variétal

La sous-estimation des variables d'état caractérisant la croissance (LAI, biomasse aérienne MASEC et quantité d'azote dans la plante QNplante) a été fortement réduite. On observe également une nette amélioration de l'estimation du rendement en grande partie grâce à la réduction du biais (la valeur du biais est passé de 3.04 t·ha⁻¹ à 1.16 t·ha⁻¹). En ce qui concerne le nombre de grains, le modèle surestimait la production d'en moyenne 170 grains·m⁻², alors qu'à présent le modèle ne sous-estime la production que de 23 grains·m⁻² (pour une production moyenne sur les essais d'environ 14500 grains·m⁻²). Enfin, l'estimation de la teneur en protéines des grains (PROTEINES) a également été améliorée, la valeur du RMSE ayant été divisée par 4 et celle du biais par 12.

Interactions génotype x environnement

Les effets génotype et environnement sont très significatifs sur le rendement et la teneur en protéines. Cependant leur interaction ne l'est pas (Tableau 4). Il en résulte que les classements des différents sites et des variétés sont indépendants et ont donc une valeur générale. L'effet du rendement sur la teneur en protéines est également fort, ce qui révèle bien un effet de compensation entre les deux variables (à un rendement fort correspondra plutôt une teneur en protéines faible et réciproquement).

Variable	Effet génotype	Effet environnement	Effet génotype x environnement	Effet rendement
Rendement (MAFRUIT)	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-5}$	1.0	–
Teneur en protéines des grains (PROTEINES)	0.0	0.0	1.0	–
Teneur en protéines des grains (PROTEINES)	0.0	0.0	$9.9 \cdot 10^{-1}$	0.0

Tableau 4 : Bilan des analyses de variance et de covariance : probabilité du test de Fisher avec en gras les valeurs inférieures à 0.05, pour lesquelles l'effet est supposé significatif

Analyse corrélative entre la teneur en protéines et les autres variables de qualité

Nous avons montré deux corrélations importantes entre la teneur en protéines des grains et les autres composantes de la qualité: l'une négative avec le mitadinage et l'autre positive avec la ténacité. A l'opposé, il n'apparaît aucune relation avec la teneur en cendre, le jaune et la moucheture.

Discussion et conclusion

Ce projet nous a permis à la fois de développer un outil de simulation de la culture du blé dur, adapté aux conditions de la région PACA et de le tester pour analyser les relations génotype x environnement vis-à-vis de la production et de sa qualité. Il n'est pas apparu d'interaction génotype x environnement mais le poids des deux facteurs pris indépendamment s'est montré très significatif à la fois en terme de production et de qualité . On a constaté que la variabilité inter-site était du même ordre de grandeur que la variabilité inter-génotype. Enfin, si la teneur en protéines est une variable clé de la qualité, nous avons montré qu'elle n'est cependant pas en relation avec le critère commercial important qu'est la teneur en cendres.

Références

- Brisson N. et al. (2003) An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18: 309-332.
- Brisson N. and Casals M-L. (2005) Leaf dynamics and crop water status throughout the growing cycle of durum wheat crops grown in two contrasted water budget conditions. *Agronomy for sustainable development* 25: 151-158.
- Casals M-L (1996) Introduction des mécanismes de résistance à la sécheresse dans un modèle dynamique de croissance et de développement du blé dur. *Thèse de doctorat INA P-G*, 75p.
- Garcia de Cortazar, I. (2001) Méthodologie de l'analyse de la qualité du blé dur en région méditerranéenne. *Mémoire de DEA, ISARA Lyon/INRA Avignon*, 59p.
- Lebonvallet S. (2002) Simulation de l'azote chez le blé dur et impacts des changements climatiques. *Mémoire de DEA, INA P-G/ INRA Avignon*, 28p.

ÉVOLUTION DE L'INDICE DE RÉCOLTE CHEZ LE MAÏS : FONCTION DU TEMPS OU DE LA TEMPÉRATURE ?

HARVEST INDEX AS FUNCTION OF DAYS OR TEMPERATURE : WHAT ABOUT THE PREDICTIONS IN CLIMATE CHANGING CONDITIONS ?

F. Ruget, B. Nicoulaud, M. Mastrorilli

INRA, CSE, bâtiment climat, Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex 9
ruget@avignon.inra.fr

Introduction

Dans STICS, il existe 2 formalismes permettant de remplir des organes de réserve : un formalisme attribuant des assimilats aux organes de réserve à la suite d'une répartition entre organes, fonction de la force des différents puits (dit formalisme indéterminé ou à superposition temporelle, car il permet de simuler la croissance simultanée de capteurs d'énergie (les feuilles) et d'organes de réserves, donc la concurrence pour les assimilats entre source et puits) et un formalisme en indice de récolte (rapport poids de grains/poids de plante entière), qui fait l'hypothèse que l'indice de récolte augmente progressivement pendant le remplissage des grains. Ce dernier est généralement utilisé pour les plantes à graines. Ainsi, l'indice de récolte augmente progressivement à partir de la fin de la période de latence (entre floraison et début de remplissage des grains), pendant la période de remplissage. La durée de cette période est elle-même définie par une somme de températures. La vitesse de remplissage peut être exprimée en 2 unités, ce qui conduit à 2 options, la vitesse peut être exprimée en inverse de jours ou en inverse de température/jour. L'utilisation de la fonction fondée sur l'indice de récolte suppose donc de choisir l'unité de la vitesse¹ d'accroissement de l'indice de récolte. L'emploi de l'option température présente l'inconvénient de fixer implicitement un indice de récolte maximum au travers du produit vitesse x durée. Sur maïs, l'emploi des jours a donné des résultats corrects dans les conditions de l'évaluation du modèle (Brisson *et al.*, 2002), malgré des différences de vitesses observées entre années. L'utilisation de l'option (vitesse en inverse de jours) en conditions de changement climatique, c'est-à-dire en température moyenne plus élevée de 4°C que la température actuelle, dans un exemple de la plaine de Valence (Gonzalez-Camacho *et al.*, 2006, soumis) donne des indices de récolte largement diminués. En effet, avec cette option, l'indice de récolte final est inversement proportionnel à la température.

Au-delà de l'idée d'attirer l'attention sur les dangers de l'utilisation de ce formalisme, de nature corrélative, dans des conditions climatiques très différentes de leurs conditions d'élaboration ou de test, le but de ce travail est de voir s'il est possible d'adapter ce formalisme à des conditions thermiques plus changeantes et, éventuellement, d'en montrer les limites. Est-il robuste par rapport à des changements importants de milieu ? quels sont les processus sous-jacents ?

1. Comment est construit et employé l'indice de récolte, sur quelles plantes, pour quels usages ? avec quelle variabilité des conditions d'utilisation ?

La notion d'indice de récolte est utilisée de longue date en agronomie et amélioration des plantes (Hay, 1995), elle l'est aussi dans les modèles de culture, par exemple sur maïs dans celui décrit par Muchow *et al.* (1990) et s'appuyant sur les formulations des travaux de Spaeth et Sinclair (1985) sur soja et un article spécifique sur maïs (Muchow, 1990). Dans son analyse d'indice de récolte sur maïs, Muchow (1990) propose un accroissement de l'indice de récolte croissant en jours et constate, pour différentes dates de semis en un seul lieu et des températures moyennes étalées de 25 à 32°C, une certaine stabilité du rendement. Le travail ultérieur de Wilson *et al.* (1995) rassemble diverses données : des données nouvelles en conditions tempérées (Lincoln, Nouvelle-Zélande) ainsi que celles de Muchow (1990) en conditions tropicales, à plusieurs dates de semis, et celles Muchow *et al.* (1990) en conditions subtropicales sur plusieurs années. Les auteurs discutent leur choix antérieur d'une expression de la vitesse en jours. En effet, les données utilisées par Muchow (1990) donnaient des vitesses peu différentes car les remplissages avaient lieu à des températures moyennes peu différentes, avec une relation entre température et vitesse croissante jusqu'à 30 °C. Les données complémentaires font apparaître une forte décroissance de la vitesse moyenne d'indice de récolte lorsque la température décroît et ces auteurs appliquent une croissance de la vitesse d'indice de récolte en fonction de la température de 8 à 19°C.

Par la suite, la notion d'indice de récolte croissant en jours a souvent été utilisée en se référant aux travaux de Muchow *et al.* (1990), généralement en utilisant la vitesse en inverse de jour. Bindi *et al.* (1999) montrent, sur des jeux d'expérimentations sur blé, tournesol, pois et soja, que l'indice de récolte en jours

¹ Nous nommerons "vitesse" l'accroissement d'indice de récolte, qui peut donc être exprimé en inverse de temps ou en inverse de température

convient bien. D'autres auteurs (Soltani *et al.*, 2004), tentent d'en améliorer le formalisme, toujours en exprimant la vitesse en inverse de jour. Même si plusieurs auteurs constatent, comme Wilson *et al.* (1995) entre lieux, que la vitesse n'est pas stable par exemple entre années, pour Bange *et al.* (1998), avec une seule expérimentation à température très basse (9°C), ou entre saisons comme Hammer et Broad (2003) (en conditions subtropicales, sur sorgho), les critiques du formalisme en jours ont toujours buté sur l'impossibilité d'obtenir un indice de récolte variable, si la vitesse et la durée sont toutes deux exprimées en température. Seuls, Wilson *et al.* (1995) utilisent une vitesse fonction de la température, probablement parce que leurs estimations sont faites dans des conditions thermiques changeantes.

De nombreux auteurs soulignent le fait que l'indice de récolte final peut être assez variable (Soltani *et al.*, 2004 sur blé, Hammer et Broad, 2003 sur sorgho). Pepler *et al.* (2006), sur blé en Angleterre, utilisent des expressions de croissance des grains en somme de température, qui expliquent bien chaque cinétique de remplissage, mais ils observent des vitesses de remplissage (en fonction de la température) différentes entre années ou entre qualités de protections fongiques, ce qui signifie que la somme de température ne peut pas à elle seule expliquer les vitesses de croissance des grains.

Il est donc nécessaire de remettre en cause ce formalisme de façon à l'adapter et pouvoir représenter des vitesses de remplissage variables selon la température, mais pouvant éventuellement conduire à des indices de récolte finaux différents, sans réduire l'indice de récolte lorsque la température augmente.

2. Les effets de la température sur le rendement en grains : liaison positive ou négative ? quels sont les mécanismes en jeu ?

D'une façon plus générale, beaucoup d'auteurs se posent la question de l'effet de la température sur la production de grains, que ce soit pour expliquer la variation des rendements entre années (hors présence de stress hydrique ou biotique, par exemple sur blé, (Pepler *et al.*, 2006)) ou pour anticiper les effets des changements climatiques à venir (Muchow *et al.*, 1990, Sheehy *et al.*, 2006 sur riz, Prasad *et al.*, 2006a sur sorgho, Prasad *et al.*, 2006b sur riz, Wheeler *et al.*, 2000).

Du point de vue des processus sous-jacents, il s'agit d'enchaînements de phénomènes de développement, conduisant à la définition du nombre de grains, puis de leur taille potentielle et, enfin, de leur remplissage. Après la fécondation, qui met en jeu l'état satisfaisant du pollen et des ovules, la température pendant la période de latence (avant remplissage des grains) détermine le nombre de cellules de l'endosperme des grains (Commuri et Jones, 1999), qui lui-même définit la taille maximale des grains. Ensuite, le remplissage des grains se fait par assimilation directe ou transferts d'assimilats remobilisables, phénomènes qui ne semblent pas être limités par la température (hors gel) dans la plupart des conditions de culture. Les phénomènes en cause pendant la période suivant la floraison sont bien étudiés : l'émission et la viabilité du pollen (Prasad *et al.*, 2006a), des divisions des cellules de l'endosperme (Commuri et Jones, 1999, Engelen-Eigles *et al.*, 2000), qui déterminent l'aptitude des grains à accumuler l'amidon. Ces phénomènes et caractéristiques sont ralentis, voire annulés, aux températures élevées, c'est-à-dire au-delà de 35°C, voire 30°C pour les plus sensibles comme la viabilité du pollen et la réceptivité des ovules. Sur riz (Sheehy *et al.*, 2006, Prasad *et al.*, 2006b), sorgho (Prasad *et al.*, 2006a) et arachide (Kakani *et al.*, 2002), toute élévation de température conduit à des réductions de rendement, car les conditions sont relativement chaudes et les gammes de températures testées se situent entre 30 et 40°C, voire au-delà de 40°C.

Les conditions de température moyenne plus élevée que 35°C posent des problèmes différents des conditions tempérées, les études en conditions tropicales-limites permettent de connaître à la fois les processus et les gammes de températures concernés par les réductions de rendement liées aux températures élevées. Cela conduit à être très attentif à l'utilisation directe de l'indice de récolte comme outil d'estimation du rendement pour le maïs, lorsque les températures moyennes peuvent atteindre 35°C, (même pendant un petit nombre de jours), c'est-à-dire lorsque des phénomènes à seuil pouvant conduire à la mortalité des grains sont en cause.

Matériel & Méthodes

1. Expérimentations

Les résultats des expérimentations suivantes déjà publiées ou utilisées par ailleurs ont été valorisées ici :

en Beauce, 2 années (1993 et 1994), 3 variétés dont une commune, expérimentations de Bernard Nicoullaud, utilisées dans l'article Brisson *et al.* (2002)

dans le Sud de l'Italie, 2 années (1996 et 1997), une variété relativement tardive, Matus, 3 niveaux de stress hydrique, expérimentation de Marcello Mastrorilli (Mastrorilli *et al.*, 1998)

en Picardie (Ruguet, 1989, Ruguet, 1993), sur une seule année, 4 variétés : 2 précoces assez bien adaptées et 2 tardives, avec 3 niveaux de densité de peuplement pour les cultures : densité normale, forte densité et forte densité éclaircie juste avant la floraison, éclaircissage qui a pour effet de modifier l'équilibre source-puits. L'utilisation de génotypes tardifs dans une zone où ils ne sont pas adaptés provoque le remplissage des grains hors de la période de croissance de la plante entière, donc à partir de réserves.

2. Formalisme en jour ou en température

Avec un formalisme de durée en somme de température, et de vitesse en inverse de jours, le rendement est inversement proportionnel à la température (sauf quand il est limité par le produit nombre de grains-poids maximum d'un grain, qui n'est pas fréquent en maïs).

Donc, avec une vitesse en inverse de jours :

$$\text{rendement} = \text{vitesse} \times \text{durée en jours} = c \times \text{somme de } T \text{ nécessaire} / T_{\text{moy}} = c \cdot d / T_{\text{moy}}$$

où c et d sont des constantes

Le rendement est inversement proportionnel à la température, ce qui est contraire à la majorité des observations de relations rendement-température (Figure 1). Si, selon des scénarios possibles, la température passe de 20°C en juillet-août à 25°C de moyenne mensuelle, la durée de remplissage diminue, le rendement diminue comme le nombre de jours, en raison inverse de la température : pour une diminution du nombre de jours de 35 (700/20) à 28 (700/25) jours, la diminution de rendement est de 20 %, soit 1/5.

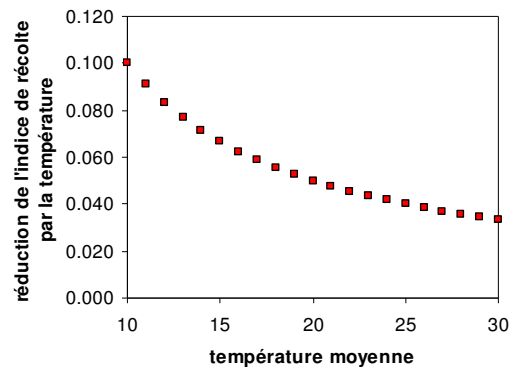


Figure 1: Coefficient de réduction du rendement par la température en cas d'utilisation du formalisme de vitesse d'accroissement d'indice de récolte en jours : variation de $1/T$ dans la gamme 10-30 °C.

Ce que nous proposons, c'est une vitesse de remplissage fonction de la température, pendant un temps défini par une somme de température, soit :

$$\text{vitesse} = aT + b$$

où a et b sont des constantes, ou plus classiquement en prenant un formalisme avec seuil

$$\text{vitesse} = a(T + (-b/a)) \text{ et rendement} = (aT + b) \times d / (T - t_{\text{dmin}})$$

où T est la température moyenne journalière, $-b/a$ est le seuil de température associé à l'accroissement d'indice de récolte, d la durée du remplissage en somme de température, t_{dmin} le seuil de température pour le développement, qui s'applique au calcul de la durée de remplissage.

Ce formalisme permet d'obtenir des indices de récolte finaux variables si le seuil de remplissage est différent du seuil de développement.

Résultats

Seuls les accroissements d'indice de récolte sont présentés ici. Les vitesses journalières moyennes sur l'ensemble de la partie linéaire du remplissage, en inverse de jour, sont représentées en fonction de la température moyenne de la même période.

La vitesse journalière moyenne (en fonction du temps) varie selon les expérimentations. Dans la figure 2, où sont représentées les points expérimentaux ainsi que les points moyens cités par Wilson *et al.* (1995), chaque ensemble de points correspondant à une même température correspond à une expérimentation. Pour chaque lieu d'expérimentation, les vitesses sont proches entre elles. Dans les expérimentations avec stress hydrique plus ou moins fort (sud de l'Italie), le stress moyen n'a pratiquement pas d'effet sur la vitesse, tandis que le stress fort la ralentit sensiblement. Dans les exemples de Beauce, les variétés ont des comportements proches, ce sont les années qui conduisent à des vitesses sensiblement différentes. Dans les expérimentations du Nord de la France avec des densités de peuplement différentes, les vitesses sont assez proches entre tous les traitements, le traitement éclairci (retour à la densité normale) a un léger avantage sur la densité normale, qui a elle-même une vitesse un peu plus élevée que celle du traitement à forte densité. Les traitements (variété, stress hydrique, densité) ont donc un effet mineur par rapport au lieu X année.

Les données de Beauce, du Sud de l'Italie et du Nord de la France montrent que la vitesse journalière est d'autant plus élevée que la température est élevée (nous sommes à des températures moyennes basses, inférieures à 20 °C), et qu'elle n'est pas dépendante de la variété (Beauce et Nord de la France), ni du stress (Sud de l'Italie).

Cela signifie que la plante attribue une part fixe de ses assimilats aux grains, suivant une demande liée à la température. L'origine de cet effet de la température pourrait se trouver dans la vitesse des divisions cellulaires de l'endosperme, qui conditionnerait la taille finale des grains (Commuri et Jones, 1999 ; Engelen-Eigles *et al.*, 2000), et peut-être la demande (potentielle) de croissance des grains donc la vitesse de remplissage. Si cette hypothèse est vraie, cela permettrait de préciser aussi la période d'action de la température, qui serait la période de latence.

La régression globale a été calculée à partir de l'ensemble des résultats présentés, y compris les 4 points moyens extraits de l'article de Wilson *et al.* (1995), correspondant à des variétés, de niveaux de stress et de disponibilités en assimilats différentes. Elle donne une bonne relation entre vitesse journalière et température, quelle que soit la forme de la régression. Le seuil de température est proche de 0 en régression linéaire, donc différent de t_{dmin} . Il est proche de t_{dmin} en régression quadratique. L'intérêt de la relation quadratique est que la vitesse plafonne au-delà de 30°C, ce qui correspond aux études sur les autres plantes, où les difficultés de mise en place de grains apparaissent à partir de ces gammes-là.

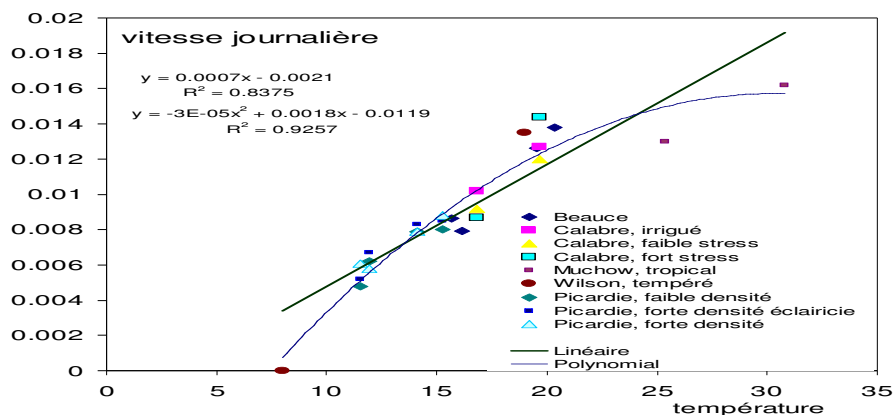


Figure 2 : Vitesse journalière d'accroissement d'indice de récolte en fonction de la température moyenne pendant la période de remplissage linéaire. A gauche, points expérimentaux, à droite régressions linéaire et quadratique, avec leurs équations.

Cela a pour conséquence, en termes de modélisation que des rendements très différents (de 20 à 100 q/ha dans nos exemples) peuvent être atteints avec une variation relative faible de l'indice de récolte final (0.38 à 0.54). Ces résultats montrent que la vitesse journalière d'indice de récolte croît avec la température, on ne peut pas faire l'hypothèse que la vitesse journalière est indépendante de la température. Il faut donc utiliser le formalisme tenant compte de la température, la mise en œuvre du formalisme de vitesse fonction de la température est possible immédiatement, elle nécessite néanmoins un paramétrage soigneux, ainsi que le contrôle des périodes d'action de la température.

Références

- Bange M.P., Hammer G.L., Rickert K.G. (1998) Temperature and sowing date affect the linear increase of sunflower harvest index. *Agron. J.*, 90: 324-328.
- Bindi M., Sinclair T.R., Harrison J. (1999) Analysis of seed growth by linear increase in harvest index, *Crop Sci.* 39: 486-493
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoulaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M-H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E. (2002) STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for maize and wheat. *Agronomie*, 22: 69-92.
- Commuri P.D., Jones R.J. (1999) Ultrastructural characterization of maize (*Zea mays* L.) kernels exposed to high temperature during endosperm cell division. *Plant Cell and Environment*, 22 (4): 375-385.
- Engelen-Eigles G., Jones R.J., Phillips R.L. (2000) DNA endoreduplication in maize endosperm cells: the effect of exposure to short-term high temperature. *Plant Cell and Environment*, 23 (6): 657-663.
- Gonzalez-Camacho J.M., Mailhol J-C., Ruget F. (2006) Impacts locaux attendus de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère sur la productivité de l'eau du maïs dans la Drôme, France. soumis à *Irrigation and Drainage*, 2006.
- Hammer GL, Broad I.J. (2003) Genotype and environment effects on dynamics of harvest index during grain filling in sorghum. *Agron. J.*, 95: 199-206.
- Hay R.K.M. (1995) Harvest index - a review of its use in plant-breeding and crop physiology. *Ann. Appl. Biol.* 126: 197-216.
- Kakani V.G., Prasad P.VV., Craufurd P.Q., et al. (2002) Response of in vitro pollen germination and pollen tube growth of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) genotypes to temperature. *Plant Cell and Environment*, 25: 1651-1661.
- Mastrorilli M., Katerji N., Rana G., Ben Nouna B. (1998) Daily actual evapotranspiration measured with T.D.R. technique in Mediterranean conditions. *Agric. and Forest Meteorol.*, 90: 81-89.
- Muchow R.C. (1990) Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Research*, 23: 145-158.
- Muchow R.C., Sinclair T.R., Bennett J.M. (1990) Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agron. J.*, 82: 338-343.
- Pepler S., Gooding M.J., Ellis R.H. (2006) Modelling simultaneously water content and dry matter dynamics of wheat grains. *Field Crops Research*, 95: 49-63.
- Prasad P.W., Boote K.J., Allen L.H. (2006a) Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain-sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures. *Agric. and Forest Meteorol.*, 139: 237-251.

- Prasad P.W., Boote K.J., Allen L.H., Sheehy J.E., Thomas JMG (2006b) Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Research*, 95: 398-411.
- Ruget F. (1989) Relations entre matière sèche à la floraison et rendement en grains chez le maïs : importance du rayonnement disponible par plante. *Agronomie*, 9 (5): 457-465.
- Ruget F. (1993) Contribution of storage reserves during grain-filling of maize in northern european conditions. *Maydica*, 38 : 51-59.
- Sheehy J.E., Mitchell P.L., Ferrer A.B. (2006) Decline in rice grain yields with temperature : models and correlations can give different estimates. *Field Crops Research*, 98: 151-156.
- Soltani A., Galeshi S., Attarbashi M.R., Taheri A.H. (2004) Comparison of two methods for estimating parameters of harvest index increase during seed growth. *Field Crops Research*, 89: 369-378.
- Spaeth S.C., Sinclair T.R.(1985) Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. *Agron. J.*, 77: 207-211.
- Wheeler TR, Craufurd PQ, Ellis RH, Porter JR and Vara Prasad PV (2000) Temperature variability and the yield of annual crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82: 159-167.
- Wilson DR, Muchow RC, Murgatroyd CJ (1995) Model analysis if temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Research*, 43: 1-18.

PROJET D'ADAPTATION DE STICS A LA PHYTOEXTRACTION DES MÉTAUX DES SOLS

ADAPTING STICS TO PHYTOEXTRACTION OF METALS FROM SOILS: A PROJECT

T. Sterckeman^{1*}, C. Moyne², N. Brisson³

¹INPL(ENSAIA)/INRA, Laboratoire Sols et Environnement (LSE), BP 172,
F-54505 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

²INPL(ENSEM)/CNRS/UHP, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA),
BP 160, 54504 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France.

³INRA, Unité AGROCLIM, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.

Introduction

La phytoextraction des métaux est conçue comme la culture, sur un sol naturellement enrichi ou contaminé par les métaux, d'un végétal accumulant ces éléments, en vue de la récolte des parties aériennes destinées à un traitement spécifique. La phytoextraction pourrait être appliquée pour décontaminer les sols ou pour en extraire des métaux de valeur. Contrairement aux techniques physico-chimiques de dépollution, elle ne réduit pas la fertilité des sols. De ce fait, l'existence d'espèces hyperaccumulantes les métaux ainsi que la demande croissante de métal et de dépollution font de la phytoextraction un procédé concevable techniquement et économiquement. Cependant, à l'heure actuelle, la technique n'est pas opérationnelle car (i) aucune plante hyperaccumulatrice n'a été améliorée de façon à obtenir des semences de cultivar commercialisables et (ii) les techniques de culture sont très peu développées (McGrath et al., 2002).

Un modèle simulant la culture au champ d'un hyperaccumulateur ainsi que le prélèvement de métal depuis le sol et sa distribution dans les organes végétaux n'a pas encore été développé. La conception d'un tel modèle serait un moyen d'accroître notre compréhension des agrosystèmes de phytoextraction. Pour l'amélioration des espèces hyperaccumulatrices comme pour la mise au point de techniques agronomiques, un modèle de culture de phytoextraction permettrait de hiérarchiser les facteurs à optimiser. Il pourrait également être utilisé comme un outil de conception des chantiers de phytoextraction.

Il y a peu de travaux sur la modélisation du prélèvement de métaux par les végétaux, ni sur leur distribution spatio-temporelle dans les organes. Les modèles utilisés pour simuler le prélèvement de soluté sont souvent du type Barber-Cushman améliorés et étendus (e.g., Darrah et al., 2006). Le transport de soluté du sol à la racine y est simulé sur une durée assez courte, dans un profil de sol homogène en conditions hydriques stationnaires. De plus, peu de validations de ces modèles ont été conduites en ce qui concerne les éléments en traces (Sterckeman et al., 2004). Par ailleurs, si des modèles de prélèvement d'eau en conditions insaturées ont été développés en France (e.g., Barataud et al., 1995; Doussan et al., 2006), ils n'ont pas été utilisés pour le prélèvement de soluté par des hyperaccumulateurs.

Notre objectif est, dans une première phase, de développer un modèle de culture pour la phytoextraction des métaux, en adaptant le modèle STICS (Figure 1). Pour atteindre ce but, nous prévoyons de :

- Adapter une ou deux espèces hyperaccumulatrices au modèle STICS, de façon à simuler le développement, la croissance et les bilans en eau, C et N de la culture.
- Développer un nouveau module à insérer dans STICS, qui simule le bilan de métal de la culture, en prenant en compte les interactions entre métaux et croissance de la plante, en terme de prélèvement racinaire, de besoins pour le fonctionnement et de limite de toxicité. Ce module comportera deux sous-modules :
 - la demande de la plante en métal, i.e. la quantité de métal absorbé par les racines et sa dynamique de distribution dans les différents organes.
 - le prélèvement de métal par les racines, en prenant en compte les conditions non saturées du sol et les processus physiques, chimiques et biologiques de la rhizosphère. Cette partie doit également quantifier le métal demeurant dans le sol, en différenciant les compartiments disponibles et non disponibles.
- Intégrer les nouveaux modules dans le modèle STICS.

Dans une seconde phase, on réalisera une analyse de sensibilité du modèle ainsi que sa validation dans des conditions agroclimatiques variées.

Notons qu'un tel modèle serait en fait capable de simuler le transfert du sol à la plante de tout élément majeur ou en traces réagissant avec la phase solide du sol, une fois que la demande de la plante pour cet élément et sa réactivité dans la rhizosphère sont paramétrées de façon générique.

Matériels et méthodes

Modèles expérimentaux

Nous nous concentrerons sur le cadmium (Cd) et le nickel (Ni), le premier étant un contaminant relativement peu retenu par la phase solide du sol, le second un métal valorisable plus énergiquement lié au sol. Nous utiliserons les écotypes sauvages de deux espèces hyperaccumulatrices de Cd et de Ni : *Noccaea caerulea* (J. & C. Presl) F. K. Meyer, qui peut hyperaccumuler Cd et Zn, et *Leptoplax emarginata* (Boiss.) Hausskn. qui est connue pour hyperaccumuler Ni et Co. Nous les cultiverons sur un sol contaminé par Cd, Pb et Zn et sur un sol développé sur serpentines, naturellement riche en Ni, Co et Cr.

Adaptation d'un hyperaccumulateur à STICS

Cette adaptation concernera seulement les mécanismes déjà incorporés dans STICS (i.e. fonctionnement énergétique, carboné, azoté et hydrique) et consistera principalement à faire le choix des formalismes et de la paramétrisation appropriés (Launay et al., 2005) en s'appuyant sur des expérimentations conduites sans stress métallique, en conditions naturelles et contrôlées. Les expérimentations au champ consisteront à cultiver des hyperaccumulateurs dans de petites parcelles de façon à mesurer les paramètres climatiques et édaphiques ainsi que ceux du développement, de la croissance et de la composition des plantes. Ces essais seront conduits sur au moins trois cycles culturaux. Le modèle sera progressivement calibré en utilisant les données des deux premiers cycles de culture et validés en utilisant les données du cycle suivant. D'autres expérimentations seront conduites en conditions contrôlées de façon à déterminer différents paramètres, comme les températures caractéristiques de germination, de développement et de croissance ou encore les paramètres caractérisant la croissance des plantules.

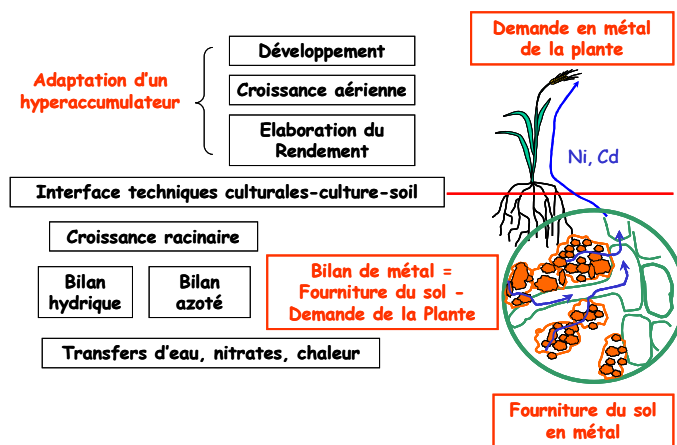


Figure 1 : Les modules de STICS existants (en noir) et les nouveaux modules envisagés (en rouge).

Modélisation de la demande de la plante

La simulation de la phytoextraction est basée sur la combinaison de la fourniture du sol à la demande de la plante (Figure 1). Cette dernière doit être décrite à deux niveaux. Au niveau de la racine, elle peut être exprimée comme un flux entrant (influx), condition limite du modèle de prélèvement racinaire (ci-après). L'objectif de nos investigations sera de modéliser cet influx en quantifiant l'effet qu'auraient sur lui certains facteurs rhizosphériques. La demande de la plante peut aussi être décrite au niveau de la plante entière. Dans ce cas, nous décrivons la dynamique de la distribution de l'élément dans les différents organes, au cours d'un cycle cultural, avec pour but de déterminer les facteurs qui la contrôlent.

Modélisation du prélèvement racinaire de métal

Il s'agit d'un module clé pour la modélisation de la phytoextraction. L'objectif est de modéliser en deux dimensions le transport du métal depuis le sol vers la surface de contact sol-racines, en prenant en compte les conditions hydriques transitoires et les processus physiques, chimiques et biologiques de la rhizosphère. Ce calcul doit fournir également la quantité de métal demeurant dans le sol. Une analyse de sensibilité du modèle sera menée, de même qu'une validation à partir d'expériences bio-physiques en chambres de cultures.

Le modèle comprendra une approche classique d'homogénéisation du milieu poreux avec une description du transport d'eau dans le sol insaturé, en particulier dans la rhizosphère, en utilisant l'équation de Richards. Les racines seront considérées comme un milieu homogène. Le modèle prendra en compte les processus d'adsorption-désorption des métaux sur la phase solide. L'absorption du métal par la racine sera

dans un premier temps formalisée par une fonction de Michaelis-Menten, qui sera éventuellement modifiée par la suite, en fonction des résultats des recherches sur la demande de la plante.

Intégration des nouveaux modules à STICS

A la suite des étapes précédentes, les formalisations du prélèvement racinaire de métal et de sa distribution dans les organes végétaux, de même que son bilan dans le sol seront explicitées et couplées à STICS. Ces formalismes seront choisis selon (i) leur vraisemblance, (ii) leur généralité, (iii) leur robustesse, et aussi, (iv) en prenant en compte l'accessibilité aux données d'entrée ainsi que (v) leur potentiel d'évolution.

Organisation

La première phase de ce programme est prévue pour quatre ans. Elle engage une partie importante de l'équipe « Phytoremédiation des sols contaminés » du LSE (notamment F. Bartoli, C. Ducobu, G. Echevarria, C. Sirguey, T. Sterckeman) qui aura en charge sa coordination et la mise en œuvre des expérimentations. Cette équipe recevra l'appui de deux chercheurs du LEMTA (C. Moyne et D. Stemmelen) qui s'attacheront au développement du modèle de transport sol-racine d'eau et de soluté. L'équipe d'AGROCLIM (N. Brisson, M. Launay et D. Ripoche) interviendra en appui à la formalisation et à l'introduction dans STICS du prélèvement racinaire et de la dynamique du métal dans la plante, ainsi qu'à l'élaboration des protocoles expérimentaux dédiés à l'adaptation de plantes hyperaccumulatrices à STICS.

Références

- Barataud, F., Moyne, C., Bréda, N. and Granier, A. (1995) Soil water dynamic in an oak stand II. A model of the soil-root network compared with experimental data. *Plant and Soil*, 172: 29-43.
- Darrah, P.R., Jones, D.L., Kirk, G.J.D. and Roose, T. (2006) Modelling the rhizosphere: a review of methods for 'upscaling' to the whole-plant scale. *European Journal of Soil Science*, 57(1): 13-25.
- Doussan, C., Pierret, A., Garrigues, E. and Pagès, L. (2006) Water uptake by roots: II - Modelling of water transfer in the soil root-system with explicit account of flow within the root system - Comparison with experiments. *Plant and Soil*, 283: 99-117.
- Launay, M., Flenet, F., Ruget, F. and Garcia de Cortazar, I., (2005) Généralité et méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. , Séminaire STICS n°5, Carry-le-Rouet, pp. 55-57.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J. and Lombi, E. (2002) Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. *Advances in Agronomy*, 75: 1-56.
- Sterckeman, T., Perriguet, J., Caël, M., Schwartz, C. and Morel, J.L. (2004) Applying a mechanistic model to cadmium uptake by *Zea mays* and *Thlaspi caerulescens*: Consequences for the assessment of the soil quantity and capacity factors. *Plant and Soil*, 262(1-2): 289-302.

THEME 2

UTILISATION DE STICS DANS LE CADRE DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE 'SECHERESSE'

USE OF STICS FOR THE COLLECTIVE SCIENTIFIC EXPERTISE 'DROUGHT'

F. Huard*, N. Brisson*, A.I. Graux*, C. Lebas**, P. Debaeke***

*INRA-Agroclim, Domaine St Paul Site Agroparc, F-84914 AVIGNON cedex 9

** INRA-Infosol, BP 20619 Ardon, F-45166 OLIVET Cedex ***INRA-UMR Arche, BP 5627

F-31326 CASTANET TOLOSAN

*huard@avignon.inra

Introduction

Dans le cadre de l'Expertise Scientifique Collective Sécheresse (ESCO Sécheresse), une approche de modélisation biophysique a été utilisée afin d'analyser les facteurs responsables des sécheresses agricoles à l'échelle du territoire. Elle s'est basée sur l'utilisation du modèle de culture STICS et différentes situations agro-pédo-climatiques. Nous proposons ici un rapide aperçu des résultats de l'étude.

Protocole

L'étude repose sur une sélection de milieux agro-pédo-climatiques permettant d'appréhender la variabilité des conditions de sécheresse d'origine climatique et/ou édaphique. Pour ce faire, 10 régions ont été choisies, chacune d'elle étant caractérisée par un climat (séries climatiques d'environ 30 ans issues de la Base de Données Agroclimatiques d'Agroclim) et 3 types de sols (Fig. 1).

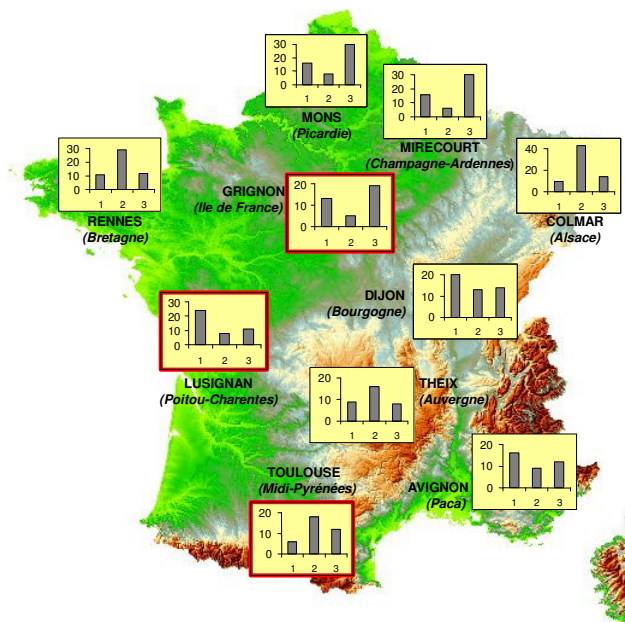


Figure 1 : Carte des sites utilisés (chaque site est associé à une station climatique et à 3 sols représentés par leur gamme de RU en % [1 : 40-100 mm, 2 : 100-160 mm, 3 : +de 160 mm])

Le choix des sols s'est effectué à partir de la carte au 1/1 000 000, sur la base de leur réserve utile et de leur profondeur. Pour chaque site, on a ainsi calculé la distribution fréquentielle de ces 2 paramètres sur la surface de la région administrative associée et en ne considérant que les sols agricoles de la Base Corine Land Cover. On a pu ainsi retenir pour chaque région un sol à faible RU (40-100 mm), un sol à forte RU (supérieur à 160 mm) et un sol dit intermédiaire (RU comprise entre 100 et 160 mm).

Deux niveaux d'approche ont été ensuite adoptés. Dans le premier, les conditions pédo-climatiques ont été uniquement appréhendées, de façon à discrétiser le poids relatif des sols et climats. Dans ce cas, nous avons utilisé STICS sur du sol nu ainsi que sur une prairie pluviale et irriguée. Dans le second niveau d'approche, la dimension agricole a été introduite sur trois régions (Ile de France, Poitou-Charentes et Midi-Pyrénées) en évaluant 3 systèmes de culture. Évalués par des experts régionaux afin qu'ils soient

véritablement réalistes des situations rencontrées dans chacune des trois régions, ils reposent sur des rotations au plus quadriennales. Les premiers systèmes, dénommés **A** dans la suite de l'étude, sont les plus consommateurs en eau et ainsi à base de cultures irriguées. A l'opposé, les systèmes C sont plus économes en eau, avec l'utilisation de cultures pluviales sans irrigation. Les systèmes de cultures B sont intermédiaires entre les deux systèmes précédents et utilisent une irrigation d'appoint (50% environ des besoins en eau des cultures). Les systèmes B et C tendent ainsi à privilégier des stratégies d'esquive, voire d'échappement, en n'occupant pas systématiquement le sol durant la période estivale (période sensible). L'ensemble des caractéristiques de ces approches est présenté dans le tableau 1.

Région	Système	Culture (variété)	Date de semis	Fertilisation KgN ha ⁻¹ (fractionnement)	Irrigation (satisfaction des besoins en eau)	
Ile de France	A	Maïs	Maïs (DK300)	15/04	175 (2)	100%
		Blé dur	Blé dur (Lloyd)	20/10	210 (3)	100%
		Betterave	Betteraves (Laser)	15/03	145 (1)	100%
		Blé tendre	Blé tendre (Appache)	05/10	225 (3)	100%
	B	Colza	Colza (Aviso)	20/08	190 (2)	-
		Blé tendre	Blé tendre (Shango)	05/10	225 (3)	50%
		Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	29/09	195 (2)	-
	C	Tournesol	Tournesol (Albena)	15/04	80 (1)	-
		Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	225 (3)	-
		Pois de printemps	Pois (Baccara)	15/03	-	-
Blé tendre		Blé tendre (Appache)	20/10	225 (3)	-	
Midi Pyrénées	A	Maïs	Maïs (Cécilia)	15/04	250 (2)	100%
	B	Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	210 (3)	50%
		Blé dur	Blé dur (Nefer)	01/10	170 (2)	50%
		Sorgho	Sorgho (DK18)	25/04	120 (2)	50%
	C	Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	170 (2)	-
		Tournesol	Tournesol (Mélody)	15/04	60 (1)	-
Poitou Charentes	A	Maïs	Maïs (Furio)	15/04	220 (2)	100%
	B	Colza	Colza (Aviso)	20/08	180 (3)	-
		Blé tendre	Blé tendre (Shango)	20/10	215 (3)	50%
		Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	15/10	185 (2)	-
	C	Tournesol	Tournesol (Mélody)	10/04	50 (1)	-
		Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	215 (3)	-
Escourgeon		Escourgeon (Alaska)	01/10	185 (2)	-	

Tableau 1 : Détail des rotations et techniques associées retenues pour les trois régions test.

Résultats

Sol nu et prairie irriguée

Tous les résultats ne peuvent être présentés dans le cadre de ce résumé. Toutefois, certains méritent d'être mentionnés. Concernant le micro-climat, les différentes simulations illustrent bien l'impact de l'occupation du sol et de la conduite des cultures. Ainsi on constate par exemple un assèchement important des surfaces en sol nu (presque 10% d'humidité moyenne annuelle en moins dans certaines situations en PACA). Dans le même ordre, il est confirmé que l'absence de couverture végétale a tendance à augmenter la température de surface, parfois de plus de 1 °C en moyenne annuelle (Fig.2).

En terme de bilan hydrique, on a pu montrer par exemple que les quantités d'eau évaporées sous un sol de prairie irriguée sont importantes, correspondant au minimum à 70 % de celles du sol nu. En effet si l'ombrage du sol par le feuillage tend à diminuer l'évaporation, l'irrigation en humectant régulièrement la surface du sol tend à l'augmenter et selon les régions et les sols une quantité d'eau importante peut ainsi être en apparence « perdue ». Les résultats montrent également des ordres de grandeurs équivalents pour les trois flux évaporatoires : transpiration des plantes irriguées, évaporation du sol sous couvert des plantes irriguées et évaporation du sol nu soumis uniquement à la pluviométrie naturelle.

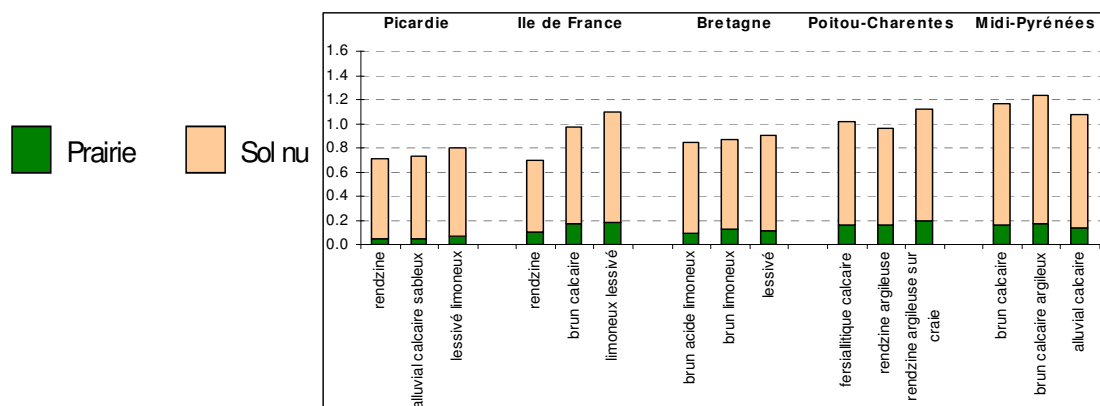


Figure 2 : Ecart moyen de température annuelle entre la surface et l'air (°C) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région. Les valeurs sont présentées de façon emboîtée mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

En situation agricole

Comme attendu, dans chacune des régions analysées, les trois systèmes de culture A, B et C correspondent à des niveaux de satisfaction de besoin en eau décroissants, les systèmes irrigués assurant presque 100% des besoins alors que les systèmes pluviaux les plus déficitaires assurant 85% des besoins, ce qui permet une consommation additionnelle des eaux pluviales par rapport au sol nu de l'ordre de 35% au minimum.

Avec de 25 à 45% des quantités d'eau apportées aux systèmes intensifs A, les systèmes B couvrent 95 % des besoins en eau des cultures. Cela s'explique par la présence de cultures d'été plus tolérantes et de cultures d'hiver auxquelles s'ajoute le rationnement du besoin par une contrainte modérée qui joue sur la réduction de la surface foliaire. Sous les systèmes A, irrigués, les quantités d'eau de drainage sont très nettement diminuées par rapport aux systèmes pluviaux (« C ») car l'évapotranspiration est stimulée par l'exubérance du feuillage. En Midi-Pyrénées, contrairement aux systèmes B basés sur l'irrigation d'appoint, les systèmes A provoquent un véritable déstockage comme pour la prairie irriguée, à l'instar d'autres régions notoirement sèches comme l'Alsace ou la région PACA. La différence thermique entre les systèmes secs et irrigués provoque des accélérations du cycle cultural de plusieurs jours.

L'étude a également permis de situer le maïs par rapport aux autres cultures. En effet, il est souvent désigné comme étant une culture très consommatrice en eau parce que très productif. Afin d'apporter des éléments chiffrés dans cette discussion, les résultats précédents ont été ré-examinés par culture sur les deux sols extrêmes à très faible et forte réserve utile. Les variables d'intérêt analysées sont la consommation en eau sur le cycle de la culture, l'irrigation nécessaire et le rendement. En faisant le rapport entre rendement et eau consommée on obtient une estimation de l'efficacité agricole de l'eau. Si l'on excepte la betterave en Ile de France, le maïs est, en effet, la culture qui consomme le plus d'eau (Figure 3) avec de 30 à 50% de cette consommation couverte par l'irrigation, l'augmentation des besoins en irrigation suivant très logiquement un gradient nord-sud. Il existe d'autres cultures d'été moins consommatrices comme le sorgho (Midi-Pyrénées) ou le tournesol mais qui évidemment produisent moins dans les contextes d'agriculture plus économes en eau dans lesquels ils sont produits (systèmes de culture B et C). Pourtant le sorgho montre une efficacité de l'eau comparable à celle du maïs, ce qui lui confère un statut agronomique substitutif par rapport au maïs. Le blé est sans doute la culture dont consommation en eau et production se rapprochent le plus de celle du maïs. Son efficacité de l'eau est bien supérieure à celle du maïs en Midi-Pyrénées.

Conclusions

Il faut considérer cette étude par modélisation, comme une illustration qui n'a pas l'ambition de reproduire une réalité précise mais seulement de montrer les possibilités offertes par l'approche de modélisation. C'est pourquoi elle procède d'une approche typologique et permet de proposer des ordres de grandeurs des variables clés du bilan hydrique et une hiérarchisation des facteurs de variation de l'impact de la sécheresse (climat, sol, système de culture). Il ressort que d'un point de vue strictement agronomique les systèmes basés sur l'irrigation de complément présentent beaucoup d'avantages et mériteraient donc d'être déclinés plus précisément pour des conditions locales bien identifiées.

Le rapport complet de l'étude est disponible sur le site internet d'Agroclim : w3.avignon.inra.fr/les_recherches__1/liste_des_unites/agroclim/documents_a_telecharger/notes_techniques

	Ile de France		Poitou-Charentes		Midi-Pyrénées	
(mm)	sol 1 : rendzine		sol 1 : fersialitique calcaire		sol 1 : brun calcaire	
	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation
600-649					◀ maïs	
550-599						
500-549	◀ betterave				◀ sorgho	
450-499			◀ maïs			
400-449	◀ maïs				◀ blé dur	
350-399	◀ blés, colza ◀ escourgeon		◀ blé tendre ◀ colza			◀ maïs
300-349	◀ tournesol		◀ escourgeon ◀ tournesol			
250-299	◀ pois			◀ maïs	◀ tournesol	◀ sorgho
200-249		◀ betterave				
150-199		◀ maïs				
100-149						
50-99		◀ blé		◀ blé		◀ blé dur
0-49		◀ colza, tournesol ◀ escourgeon, pois		◀ colza, tournesol ◀ escourgeon		◀ tournesol
(mm)	sol 3 : limoneux lessivé		sol 3 : rendzine argileuse sur craie		sol 3 : alluvial calcaire	
	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation
600-649					◀ maïs	
550-599						
500-549	◀ betterave				◀ sorgho	
450-499			◀ maïs		◀ blé dur	
400-449	◀ maïs ◀ escourgeon ◀ blé tendre ◀ colza		◀ tournesol ◀ blé tendre			
350-399	◀ tournesol ◀ blé dur		◀ escourgeon ◀ colza		◀ tournesol	
300-349						
250-299	◀ pois					◀ maïs
200-249						
150-199		◀ betterave, maïs				◀ sorgho
100-149						
50-99				◀ maïs		◀ blé dur
0-49		◀ blé, colza ◀ tournesol ◀ escourgeon, pois		◀ blé tendre ◀ tournesol, colza ◀ escourgeon		◀ tournesol

Figure 3 : Position relatives des cultures en termes de consommation en eau et de besoins en irrigation sur les 2 sols "extrêmes" (moyennes pour l'ensemble des systèmes de culture)

Références

- Baker D.N., Meyer R.E. (1966) Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton. *Crop Sci.* 6: 15-19.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Nicoullaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R. (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. (2003) An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18: 309-332.
- de Wit C.T., Brouwer R., Penning de Vries F.W.T. (1970). The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 47-50.
- Duncan W. G. (1971) Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. *Crop Sci.* 11: 482-485.

UTILISATION INVERSE DES MODELES DE CULTURE

INVERSE USE OF CROP MODELS

M. Guérif, S. Buis, V. Houlès, M. Launay, C. Lauvernet

INRA, UMR1114 Unité CSE, Site Agroparc, F-84914 Avignon

mog@avignon.inra.fr

Introduction

Comme tout modèle mathématique, les modèles de culture constituent une représentation simplifiée de la réalité, basée sur un « point de vue » du système modélisé, et sont le reflet des connaissances de la communauté scientifique. Stics n'échappe pas à la règle. S'ils constituent un lieu privilégié d'intégration de nouvelles connaissances dans les domaines disciplinaires de ses compétences, ces modèles peuvent également, compte tenu du niveau de maturité auquel ils sont parvenus, être utilisés pour représenter le fonctionnement des cultures et des systèmes de culture avec une diversité d'objectifs. Parmi ces objectifs, on peut citer : l'évaluation de stratégies et de systèmes de cultures nouveaux, l'optimisation des pratiques vis-à-vis de la performance agronomique et environnementale, la réalisation d'analyses prospectives, le couplage du modèle avec d'autres modèles (de transfert radiatif, climatiques, de transferts entre la surface et l'atmosphère, la surface et la nappe) pour mieux représenter le comportement de la surface dans les écosystèmes cultivés. Une des limitations que l'on rencontre dans ces applications spatialisées du modèle, réside dans la difficulté à renseigner en tout point les variables d'entrée nécessaires, en particulier celles qui décrivent les conditions initiales, ou bien les propriétés fonctionnelles du sol ou encore l'itinéraire technique.

Avec le progrès technologique, un grand nombre d'observations sur les états des cultures est désormais disponible. La télédétection permet d'accéder au développement foliaire et à la teneur en chlorophylle des feuilles, à sa température de surface, à l'état hydrique de la surface du sol sur de grands espaces avec différentes résolutions spatiales; les moissonneuses équipées de capteurs fournissent des informations spatialisées sur le rendement des cultures et les mesures de résistivité électrique reflètent la profondeur des sols au sein des parcelles. Il devient envisageable, en mobilisant toutes ces informations, d'utiliser le modèle en mode inverse, et d'estimer les variables d'entrée inconnues. Dans le cadre de l'utilisation de données de télédétection où l'on a conduit plusieurs travaux (Houlès 2004, Launay et Guérif, 2005, Guérif et al, 2006), les méthodes mises en œuvre ont été qualifiées, par analogie avec ce qui était pratiqué dans d'autres domaines avec d'autres modèles, d'« assimilation de données ». Elles relèvent en réalité plus généralement des méthodes d'estimation de paramètres (Makowski et al, 2006). Leur application aux modèles complexes que sont les modèles de culture pose des problèmes spécifiques, liés essentiellement au grand nombre de paramètres à estimer.

Après un exposé rapide des méthodes envisageables, on donnera quelques exemples d'application, essentiellement basés sur l'utilisation d'observations de télédétection dans différents modèles, et appliqués à l'inversion du modèle pour estimer des propriétés des sols, des composantes de l'itinéraire technique, ou encore du résultat de l'interaction entre ITK, propriétés des sols et croissance.

Méthodes

Différentes méthodes d'estimation de paramètres peuvent être appliquées aux modèles de culture. Le choix d'une méthode adaptée va dépendre de critères tels que le nombre de paramètres à estimer, la quantité d'observations utilisée, le coût du modèle, ou l'existence d'information a priori sur les paramètres à estimer, ... Par ailleurs, face à la complexité des modèles de culture, une phase préalable de sélection des paramètres à estimer peut être nécessaire pour améliorer les performances de l'estimation ou réduire le coût du processus d'estimation. Selon Makowski et al (2006), cette sélection peut se faire à partir de l'analyse de la littérature (en fixant une partie des paramètres aux valeurs prescrites), de l'analyse des équations du modèle (afin de limiter les problèmes d'identifiabilité), d'analyses de sensibilité et de choix en fonction de la minimisation de l'erreur de prédiction. Nous renvoyons le lecteur à cet article et celui de Monod et al (2006) pour une revue de ces méthodes. Nous présenterons dans la suite des méthodes que nous avons nous-mêmes mises en œuvre.

Méthodes traditionnelles de régression non linéaire

Cette famille de méthodes est basée sur la recherche des valeurs des paramètres dans l'espace des possibles par minimisation d'une fonction coût construite sur les écarts entre les valeurs simulées par le modèle et les observations (moindres carrés ordinaires ou généralisés). Les algorithmes de descente utilisés peuvent s'appuyer sur le calcul (souvent approché) des dérivées de la fonction (Gauss Marquardt,

Levenberg) ou non (Simplexe, Price). Les valeurs des paramètres peuvent être contraintes dans un espace de valeurs possibles (défini par des bornes). L'application de ce type de méthodes a été faite au modèle Sucros pour retrouver des paramètres sol et des modalités d'implantation de la culture (voir plus loin).

Une limitation importante de ce type de méthode est liée au nombre généralement limité d'observations disponibles au regard du grand nombre de paramètres à estimer. Cela résulte en une surdétermination du problème et de faibles performances en terme de précision des résultats obtenus.

Méthodes Bayésiennes

Pour dépasser les limites des méthodes traditionnelles (faible nombre de paramètres estimables, possibilité de converger vers des minima locaux de la fonction coût), nous avons eu recours aux méthodes Bayésiennes de type stochastique, qui donnent une description complète des variables d'état du modèle et de ses paramètres, à travers une fonction de densité de probabilité a posteriori, grâce à l'utilisation combinée des observations, du modèle et de l'information a priori disponible.

La méthode Glue est une méthode de type Monte Carlo, qui consiste en la génération stochastique - à partir des distributions a priori des paramètres à estimer - d'un grand nombre de jeux de paramètres, puis la réalisation des simulations associées. Le calcul de la vraisemblance de chaque simulation - *sachant les observations* -, permet d'affecter un poids à chaque jeu de paramètres, et de définir la distribution a posteriori des paramètres. Nous l'avons appliqué à Stics dans le cadre de travaux sur l'agriculture de précision, avec l'objectif d'estimer de façon spatialisée certaines variables d'entrée et paramètres du modèle (voir plus loin).

Notons qu'il existe d'autres méthodes stochastiques n'utilisant pas le théorème de Bayes mais une analyse de sensibilité qui permet, par la minimisation conjointe de plusieurs fonctions coût, de sélectionner les paramètres à estimer et de réduire itérativement leur gamme de variation jusqu'à un intervalle très limité. Cette méthode, appelée MCIP (Demarty et al, Houlès, 2004) a été comparée à Glue sur la même application et a donné des résultats comparables.

D'autre part, une des limitations importantes des applications d'estimation de paramètres étant le caractère mal posé du problème, une méthode a été proposée et testée sur un modèle simple (Lauvernet, 2005), pour diminuer le rapport entre nombre de paramètres à estimer et nombre d'observations en appliquant des contraintes spatiales. Cette technique repose sur la minimisation d'un critère de type Bayésien, i.e. qui inclus de l'information a priori sur les paramètres à estimer sous la forme d'un terme d'écart entre ces paramètres et leur valeur a priori pondéré par une estimation de l'erreur sur cette valeur. Le problème, résolu globalement sur l'ensemble des pixels, est de taille importante, et il est donc résolu par une méthode de minimisation utilisant la dérivée de la fonction à minimiser, calculée pratiquement grâce à l'adjoint du modèle de culture. La génération du modèle adjoint de STICS est en cours de réalisation.

Méthodes empiriques

Lorsque le nombre de paramètres à estimer est petit et que l'ensemble des combinaisons possibles de leurs valeurs discrètes est dénombrable à partir d'informations extérieures, on peut envisager d'utiliser des méthodes empiriques. Elles consistent à simuler l'ensemble des possibles et à retrouver les combinaisons acceptables à partir de calculs de distances entre valeurs simulées et observées. Nous verrons un exemple de cette approche pour retrouver des itinéraires techniques à partir des profils temporels de LAI estimés par télédétection. Nous renvoyons au poster présenté par Hadria et al pour illustrer ce type d'approche dans le cas de recherche d'itinéraires techniques à l'échelle d'une petite région en utilisant des données de télédétection.

Exemples d'application

Estimation de conditions initiales avec le modèle Sucros betterave

Le problème est ici d'estimer les paramètres qui décrivent la croissance de l'indice foliaire des betteraves en phase juvénile, facteur déterminant de la mise en place de la couverture foliaire et du rendement en sucre. Ces paramètres (durée semis-levée, nombre de plantes levées, vitesse initiale de croissance), et leur résultante, que l'on peut traduire par un état de croissance à 500°C jour depuis le semis (LAI500) sont éminemment variables en fonction des conditions d'implantation (cf. Guérif et Duke, 1998) et, dans une optique de diagnostic régional ou de prévision des rendements, il est capital de l'estimer pour chaque parcelle. On a montré que cela était possible, grâce à l'utilisation de 4 à 5 images de télédétection, dans le modèle couplé culture Sucros * Sail (modèle de transfert radiatif qui permet de simuler les réflectances) (Launay et Guérif, 2005). La méthode utilisée était une méthode variationnelle basée sur un algorithme proche du Simplexe (Price) et visait à minimiser une fonction coût, sans utilisation d'information a priori.

La figure 1 illustre le résultat pour une parcelle (à gauche) et pour un ensemble de 48 parcelles de deux bassins sucriers. On montre que 58 % des parcelles sont bien classées lorsqu'on cherche à la répartir dans des classes de bonne, moyenne ou mauvaise implantation.

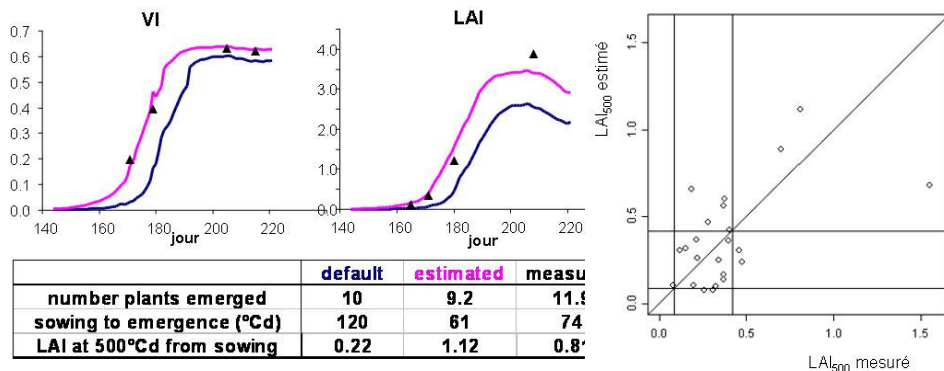


Figure 1 : Estimation du résultat de l'implantation de la culture sur une parcelle particulière (à gauche) et sur un ensemble de parcelles (à droite). D'après Launay et Guérif, 2005.

Estimation de propriétés de sols avec STICS-Bié

Dans le cadre de l'agriculture de précision, on a montré qu'il était possible d'utiliser le modèle Stics pour réaliser des préconisations de doses d'azote (Houlès et al, 2004, 2007). La méthode consiste à sélectionner une dose optimale par évaluation par le modèle d'un critère agro-environnemental prenant en compte la marge brute et le bilan d'azote pour différentes doses d'azote. Pour réaliser des préconisations spatialisées, il est nécessaire de disposer de la distribution spatiale des variables d'entrée du modèle. Pour cela, on a eu recours à l'assimilation d'observations issues de la télédétection (Lai et azote absorbé par le couvert, obtenus par inversion de données hyperspectrales) afin d'estimer en chaque point de la parcelle les propriétés de sol les plus importantes pour la simulation par le modèle des variables d'intérêt (Houlès, 2004, Guérif et al, 2007).

La méthode utilisée est une méthode Bayésienne de type Importance Sampling, utilisant une information a priori sur les paramètres sol, issue d'une carte pédologique associée à des fonctions de pédotransfert. 10 paramètres sol et 2 paramètres plante ont été sélectionnés après une analyse de sensibilité.

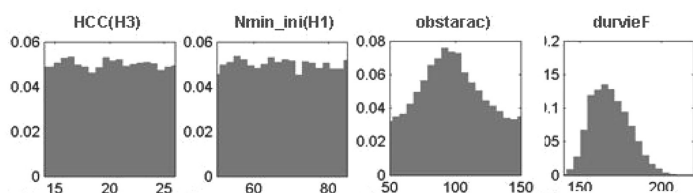


Figure 2 : Distribution a posteriori obtenue pour 3 paramètres sol et un paramètre plante pour un pixel.

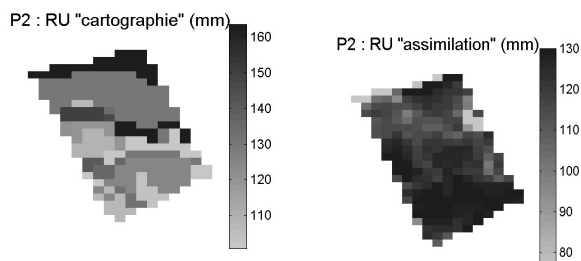


Figure 3 : Comparaison de l'estimation des réserves utiles en utilisant l'approche par cartographie (RU « cartographie ») et l'approche par assimilation de données

On a d'abord montré, sur des données « pseudo observées » (simulées par le modèle et bruitées), et en utilisant 15 dates, que la méthode permet de préciser la distribution a posteriori des paramètres les plus influents (comme *obstarac*, cf. Fig.2) et d'obtenir ainsi des prédictions améliorées des variables de sortie du modèle (rendement, teneur en protéine du grain). Quand on utilise de vraies observations, moins nombreuses (4 dates), on constate que les estimations des variables de sortie du modèle sont toujours améliorées par rapport à ce que permet de réaliser l'information a priori. Cependant, dans ce cas, l'estimation des paramètres est plus délicate et donne des résultats sensiblement différents de ceux que l'on a pu mesurer par échantillonnage sur le terrain (Fig. 3) pour la réserve utile. Ces derniers ne sont d'ailleurs que des estimations elles-mêmes approchées des paramètres exprimés dans le modèle.

Par ailleurs, les estimations des variables sol ne semblent pas très robustes, dans la mesure où leur utilisation pour une année autre que celle où l'on a procédé à l'assimilation de données, ne donne pas de

bons résultats. A partir de ces premiers travaux, la méthode d'estimation reste à conforter, en augmentant le nombre d'observations (en utilisant des observations d'origines diverses, sur plusieurs années) et en utilisant une information a priori la plus précise possible, y compris en utilisant la dimension spatiale contenue dans les observations. (Thèse en cours de H. Varela sur ce sujet).

Conclusion

L'utilisation combinée, en mode inverse, des modèles de culture et d'ensembles de données observées sur les variables d'état qu'ils simulent ouvre des perspectives importantes de caractérisation des parcelles agricoles, qu'il s'agisse de propriétés fonctionnelles permanentes, dans des contextes où les pratiques sont connues, ou bien, à une échelle plus large, de caractéristiques conjoncturelles liées aux pratiques agricoles. La connaissance de ces propriétés et de ces pratiques, est tout à fait essentielle pour bien décrire le fonctionnement des parcelles.

Des acquisitions automatisées de données sur les états du couvert plus nombreuses et plus accessibles devraient être disponibles dans le futur. Au-delà des premiers travaux réalisés, il y a un enjeu important à progresser sur le développement des méthodes inverses pour valoriser ces ensembles de données et en déduire des informations sur les parcelles.

Références

- Demarty J., Otlé C., Braud I., Oliosio A., Frangi J.P., Bastidas L.A., Gupta H., (2004) Using a multi-objective sensitivity analysis approach to retrieve information on surface properties used in a SVAT model., *Journal of Hydrology*, Volume 287, Issues 1-4, 25 February 2004, p. 214-236.
- Guérif M., Houlès V., Makowski D., Lauvernet C. (2006) Data assimilation and parameter estimation for precision agriculture using the crop model STICS. In: "Working with Dynamic Crop Models", Wallach D., Makowski D. and Jones J. W. (eds.), Elsevier, 395:401.
- Hadria R. et al. (2006) Couplage du modèle STICS et de données de télédétection optique pour la détermination des pratiques culturales en région des Alpilles. Dans ce séminaire.
- Houlès V. (2004) Mise au point d'un outil de modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture. Thèse I.N.A.-P.G., 294 pp.
- Launay M., Guérif M., (2005) Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111: 321-339.
- Houlès V., Mary B., Guérif M., Makowski D., Justes E., 2003. Evaluation of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie* 24: 339-349.
- Lauvernet C. (2005) Assimilation variationnelle des observations de télédétection dans les modèles de fonctionnement de la végétation : utilisation du modèle adjoint et prise en compte des contraintes spatiales. Thèse de l'Université Joseph Fourier, 2005.
- Makowski D., Hillier J., Wallach D., Andrieu B., Jeuffroy M.H.(2006) Parameter estimation for crop models. In "Working with dynamic crop models". Wallach D, Makowski D and Jones J W (eds.), Elsevier, 101:150
- Monod H., Naud C., Makowski D. (2006) Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. In "Working with dynamic crop models". Wallach D, Makowski D and Jones J W (eds.), Elsevier, 55:100.

UTILISATION DU MODELE STICS POUR ETUDIER LES INTERACTIONS ENTRE ESPECES ASSOCIEES

USE OF THE STICS MODEL TO STUDY THE INTERACTIONS BETWEEN INTERCROPPED SPECIES

G. Corre-Hellou*, Y. Crozat

ESA, 55 rue Rabelais, BP 30748 F-49007 Angers cedex 01

*g.hellou@groupe-esa.com

Introduction

Dans des cultures associées (culture simultanée de deux espèces ou plus sur la même parcelle durant un cycle cultural (Willey, 1979)), les espèces sont en compétition à la fois au niveau aérien pour la lumière et au niveau racinaire pour l'eau et les éléments minéraux. La compétition racinaire aurait en général plus d'impact sur les performances que la compétition pour la lumière (Wilson, 1988). Cependant on dispose de peu de connaissances sur les facteurs clés qui influencent les interactions de compétition entre espèces pour les ressources du sol. Il est en effet souvent difficile par la seule voie de l'expérimentation au champ de hiérarchiser les facteurs puisqu'ils sont souvent en interaction entre eux et avec le milieu. Etant donné la complexité de ces systèmes, des modèles dynamiques de simulation du fonctionnement des cultures associées pourraient être utilisés pour tester des hypothèses sur les mécanismes régissant la compétition entre espèces.

Dans des associations céréale-légumineuse, il a été montré que la compétition entre espèces pour l'azote du sol durant la phase végétative influençait fortement les performances finales de l'association (Corre-Hellou et al, 2006). La céréale apparaît beaucoup plus compétitive que la légumineuse pour l'azote du sol forçant la légumineuse à reposer davantage sur la fixation symbiotique que si elle était cultivée seule. La plus forte compétitivité de la céréale est souvent attribuée à son enracinement plus rapide (Hauggaard-Nielsen et al, 2001, Corre-Hellou et Crozat, 2005). Le présent travail cherche à tester à l'aide du modèle STICS si les différences d'enracinement entre le pois et l'orge cultivés ensemble sont réellement déterminantes dans la compétition pour l'azote du sol et l'accumulation de biomasse par chaque espèce. Cette hypothèse est testée pour différents niveaux de disponibilités en azote minéral.

Matériels et méthodes

Le modèle STICS cultures associées

Le modèle utilisé est l'extension du modèle STICS pour les cultures associées (Brisson et al., 2004). Ce modèle a été adapté pour la simulation des cultures associées pois-orge de printemps à partir du paramétrage du modèle pour le pois et l'orge purs et la modification de quelques formalismes (introduction d'un lien entre la fixation symbiotique et la croissance végétative, d'un lien entre la croissance racinaire et la croissance aérienne et la possibilité de simuler des inversions de dominance en terme de hauteur au cours du cycle). Ce modèle permet en l'absence de facteurs limitants autre que l'azote de simuler correctement dans des associations pois-orge cultivés en rang alternés la croissance, la quantité d'azote accumulé et la fixation symbiotique tout au long du cycle (Corre-Hellou et al, 2005).

Scénarios testés

Le modèle est tout d'abord utilisé pour comparer la compétition entre espèces en fonction des écarts d'enracinement. Dans un premier scénario (Sc), l'orge a une vitesse d'enracinement de 1.4 mm par degré-jour alors que le pois a une vitesse d'enracinement de 0.9 mm par degré-jour. Ces paramètres sont fixés d'après les observations faites dans les expérimentations au champ en cultures pures et en association (Corre-Hellou et Crozat, 2005). Dans un second scénario, on suppose que les deux espèces ont la même vitesse d'enracinement : 0.9 mm par degré-jour. Cet effet enracinement est étudié pour trois niveaux de disponibilités en N (tableau 1).

scénarios	Disponibilité en N	Vitesse d'enracinement
1	Faible	Orge > Pois
2	Disponibilité au semis : 70 kg ha ⁻¹ sur 0-70cm Aucun apport	Orge = Pois
3	Moyenne	Orge > Pois
4	Disponibilité au semis : 70 kg ha ⁻¹ sur 0-70cm Apport : 130 kg N ha ⁻¹ au semis	Orge = Pois
5	Forte	Orge > Pois
6	Disponibilité au semis : 70 kg ha ⁻¹ sur 0-70cm Apports : 100 kg N ha ⁻¹ au semis + 100 kg N ha ⁻¹ (28/4) + 50 kg N ha ⁻¹ (10/05)	Orge = Pois

Tableau 1 : Description des scénarios testés

Résultats

Le modèle simule correctement l'enracinement des deux espèces associées. Les racines d'orge ont une progression plus rapide que les racines de pois (Figure 1). A la fin de la phase végétative, les racines d'orge sont plus profondes de 20 cm. L'enracinement n'est pas modifié en fonction de la disponibilité en azote. L'utilisation du modèle permet de montrer que l'orge a accès à une plus grande quantité d'azote minéral que le pois durant la phase végétative (Figure 2), grâce à son enracinement plus rapide. La quantité d'azote minéral disponible uniquement pour les racines d'orge représente 25 à 45% de l'azote total disponible soit 20, 30 et 50 kg N ha⁻¹ pour la faible, la moyenne et la forte disponibilité respectivement. Cet avantage est maximal au stade épi 1 cm ou stade 6 feuilles du pois (28/04) puis décroît pour être nul à la fin de la phase végétative (26/05) quand les deux espèces ont atteint leur profondeur maximale d'enracinement.

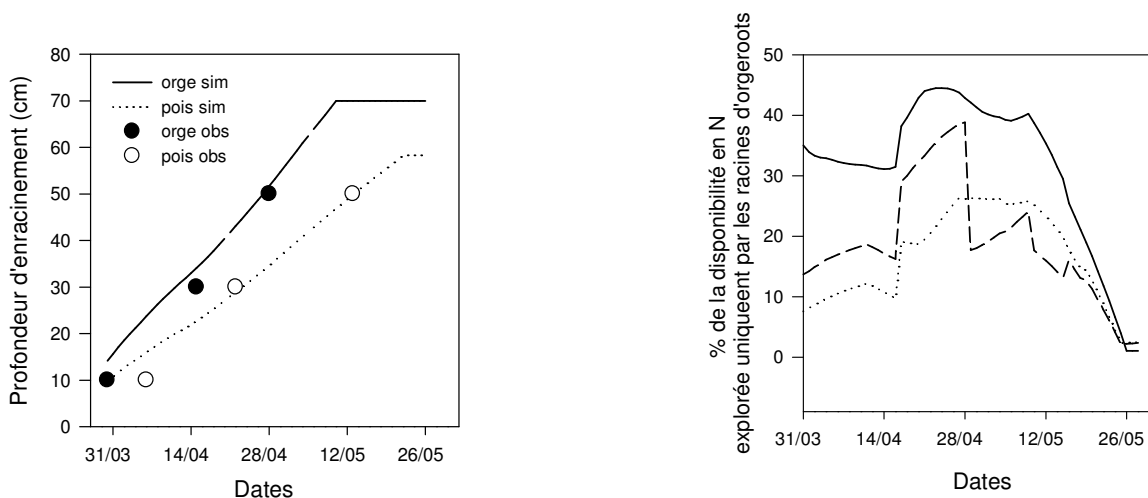


Figure 1 : Evolution de la profondeur d'enracinement du pois et de l'orge associés (observations et simulations)

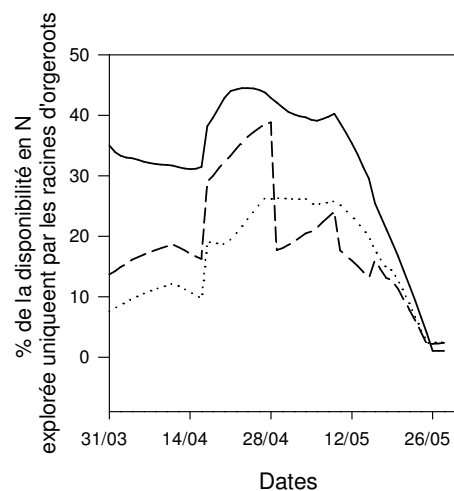


Figure 2 : Pourcentage d'azote minéral disponible pour les racines d'orge en fonction du niveau de disponibilité en azote (faible :---, moyenne :..... et forte : - - -)

Les différences d'enracinement n'affectent les performances que dans le cas d'une faible disponibilité en N minéral (Figure 3). Quand l'orge a une vitesse d'enracinement similaire à celle du pois, le pourcentage d'orge dans la biomasse du mélange diminue de 12% et le pourcentage d'orge dans l'accumulation d'azote du sol diminue de 20%.

En revanche, avec des disponibilités en N supérieures, le partage de l'azote du sol et la part de chaque espèce dans la biomasse produite est similaire avec les deux scénarios d'enracinement.

Quelque soit le scénario d'enracinement, la disponibilité en azote a un fort impact sur les performances (Figure 3). L'augmentation de la disponibilité en azote entraîne une forte augmentation de la quantité d'azote accumulée et la croissance de l'orge. Quant au pois, sa croissance tend à diminuer avec des fortes disponibilités en N. Le pourcentage d'orge dans la biomasse totale passe de 44% avec une faible disponibilité en N (Sc1) à 82% avec une forte disponibilité en N (Sc5). Ces écarts de performances simulées par le modèle en fonction de la disponibilité en N sont cohérents avec les observations réalisées au champ sur les expérimentations ayant servi au test du modèle (Corre-Hellou et al, 2006) et avec des travaux antérieurs sur la comparaison d'associations céréale-légumineuse cultivées avec ou sans fertilisation azotée (Jensen, 1996 ; Andersen et al, 2005)

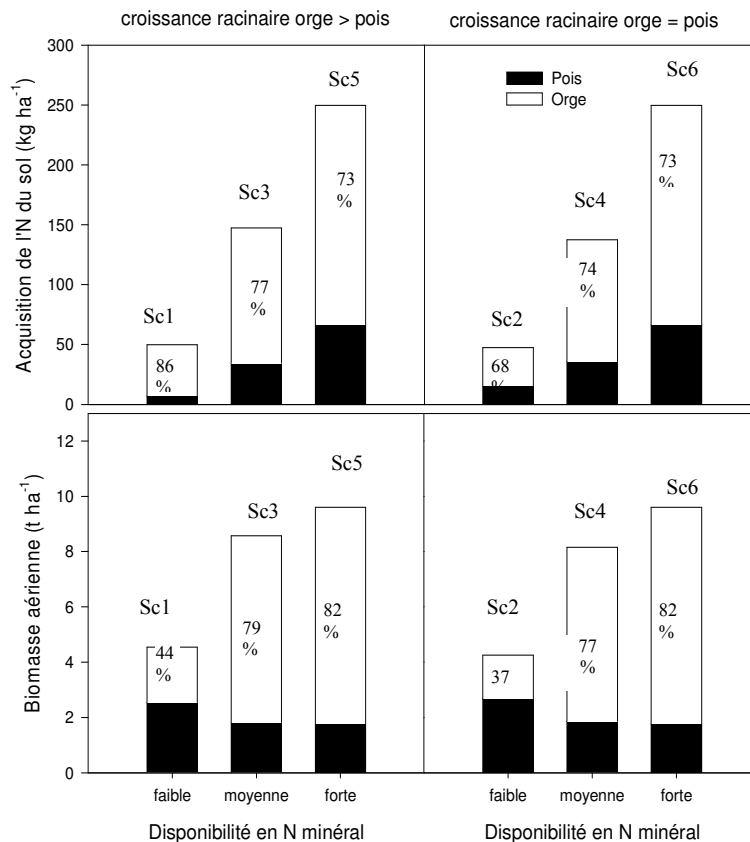


Figure 3 : Acquisition de l'azote du sol et biomasse aérienne du pois et de l'orge associés pour deux scénarios d'enracinement et trois niveaux de disponibilité en N minéral

La figure 4 illustre l'évolution de la demande en N des deux espèces associées au cours de la phase végétative. Avec une faible disponibilité en azote, l'orge présente une demande légèrement supérieure à celle du pois. Les écarts de demande entre espèces augmentent avec la disponibilité en azote. La demande des deux espèces est quasiment similaire pour les deux scénarios d'enracinement.

Conclusion

L'utilisation du modèle montre que l'orge a bien accès à une plus grande quantité d'azote minéral en raison de son enracinement plus rapide. Toutefois cet avantage, qui se limite à la phase végétative, n'influence les performances de l'association que dans le cas d'une faible disponibilité en azote minéral. Avec des disponibilités en azote minéral plus élevées, la compétition interspécifique pour l'azote du sol n'est pas affectée par les différences d'enracinement. Dans ces situations, ce sont les différences de demande en N qui influencent le plus la compétition et les performances de l'association.

Ce travail montre l'intérêt d'une approche de modélisation en complément de l'expérimentation pour tester des hypothèses sur les interactions entre espèces associées. L'utilisation du modèle permet d'isoler des facteurs et d'analyser des variables telles que la demande en azote qui sont difficiles à évaluer de façon dynamique au champ. Cette méthode peut être étendue à l'étude de la compétition pour d'autres ressources à la fois dans le temps et dans l'espace dans diverses associations d'espèces.

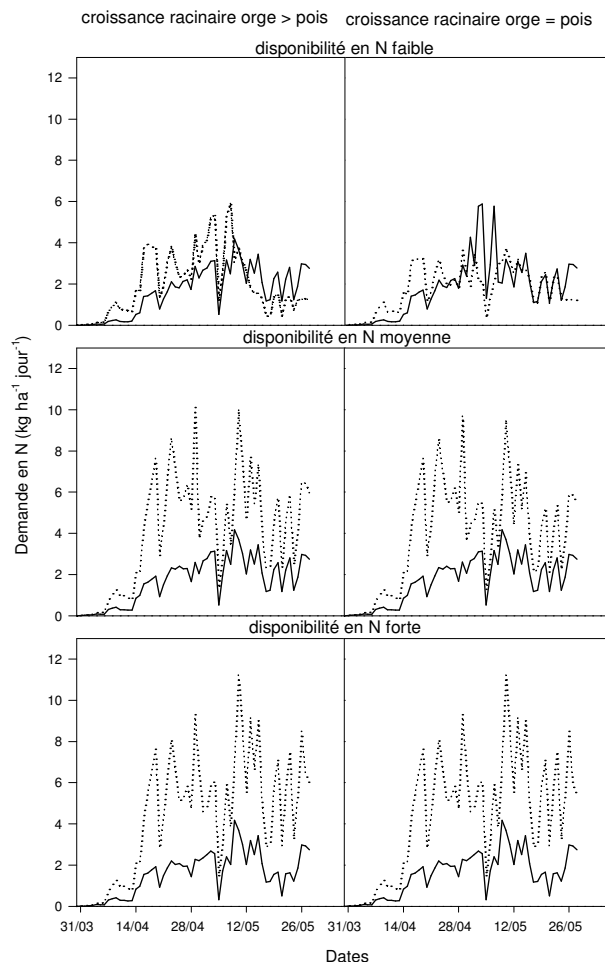


Figure 4 : Simulation de la demande en N du pois (----) et de l'orge (....) associés, durant la phase végétative pour les deux scénarios d'enracinement et les trois niveaux de disponibilité en N

Références

- Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Ambus P. and Jensen E.S. (2005) Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant and Soil*, 266: 273-287.
- Brisson N., Bussi re F., Ozier-Lafontaine H., Tournebize R., Sinoquet H. (2004) Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie*, 24: 1-9.
- Corre Hellou G., Crozat Y. (2005) Assessment of root system dynamics of species grown in mixtures under field conditions using herbicide injection and 15N natural abundance methods : a case study with pea, barley and mustard. *Plant and Soil*, 276 (1-2): 177-192.
- Corre-Hellou G., Faure M.L., Brisson N., Crozat Y. (2005) Simulation du fonctionnement des cultures associées orge-pois. *In Séminaire STICS, INRA, 17-18 Mars, Carry-le-Rouet, France.*
- Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y. (2006) Interspecific competition for soil N and its interactions with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 282: 195-208.
- Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S. (2001) Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops – a field study employing P32 technique. *Plant and Soil*, 236: 63-74.
- Jensen E.S. (1996) Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, 182: 25-38.
- Wiley R.W. (1979) Intercropping - Its importance and Research Needs. Part 1. Competition and Yield advantages. *Field Crops Abstr.*, 32: 1-10.
- Wilson J.B. (1988) Shoot competition and root competition *Journal of Applied Ecology*, 25: 279-296.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet INTERCROP (www.intercrop.dk) financé par l'Union Européenne (V^{ me} PCRD)

APPLICATION DE STICS A UN RESEAU DE PARCELLES DE CABERNET FRANC EN VAL DE LOIRE

APPLICATION OF STICS TO A CABERNET FRANC PLOTS NETWORK IN THE LOIRE VALLEY

C. Coulon*, **N. Bottois****, **G. Barbeau*****

INRA Angers, UMT VINITERA, Unité Vigne et Vin, 42 rue Georges Morel, F-49071 Beaucouzé Cedex

* cecile.coulon@angers.inra.fr, **nicolas.bottois@angers.inra.fr, *** gerard.barbeau@angers.inra.fr

Introduction

Les travaux de l'Unité Vigne et Vin de l'INRA d'Angers (UVV-INRA) traitent de l'étude du terroir, de l'élaboration de la qualité du raisin et de la typicité sensorielle des vins. Depuis 2001, l'UVV-INRA participe à la mise en place de STICS-Vigne en fournissant des données à l'INRA d'Avignon pour paramétrer le modèle. L'utilisation de STICS-Vigne n'avait pas encore été évaluée à la seule échelle du Val de Loire. Le principal objectif des travaux était au départ de déterminer s'il était possible d'en dégager des sorties opérationnelles afin de caractériser les potentialités des zones étudiées. Suite à sa première utilisation il est apparu qu'il était tout d'abord nécessaire de valider le modèle en Val de Loire : celui-ci pouvant fonctionner à une échelle nationale mais pas nécessairement à une échelle plus locale et étant calibré au départ avec des conditions de milieu " méditerranéen ". Les questions qui se sont alors posées sont : le modèle STICS permet-il actuellement d'obtenir des sorties opérationnelles pour caractériser les potentialités des parcelles, les variables simulées sont-elles conformes aux variables réelles ? Quels éléments nécessitent d'être améliorés ?

Méthodologie de travail

Réseaux et données acquises

Deux types de bases de données ont été acquis : une base de données écophysiologicals, acquise sur le site expérimental de l'INRA à Montreuil-Bellay (49), utilisée pour le paramétrage de STICS et une base de données historiques résultant des essais terroirs menés par l'UVV-INRA. Les résultats présentés sont issus du suivi de 2003 à 2005 d'un réseau de parcelles de Cabernet franc situées sur les vignobles de Saumur-Champigny, Chinon et Bourgueil qui présentent des itinéraires techniques identiques. Pour chaque parcelle des analyses de sol effectuées en 2001 ont été complétées en 2006 par des fosses pédologiques afin d'obtenir les caractéristiques texturales et la composition du sol de chaque parcelle, ce travail a été réalisé par l'équipe de la Cellule Terroir Viticole (CTV) de la Confédération des Vignerons du Val de Loire. Différentes mesures ont été réalisées durant le cycle végétatif et à la récolte, notamment: relevés des stades phénologiques, évolutions de la croissance, rendements, compositions des baies et poids de bois de taille. Concernant la météo, chaque parcelle est référencée par rapport à une station météo propre ou commune à plusieurs parcelles suivant sa localisation. Les données météo n'étaient disponibles que sur le cycle végétatif, les données hivernales correspondent aux données météo du site expérimental de Montreuil-Bellay. Ceci est possible du fait de la proximité du site de Montreuil-Bellay et du fait de la faible hétérogénéité climatique entre les parcelles durant la période hivernale.

Noms des parcelles	Types de sol
SenS1, SenS2 et SenS3	Sénonien sableux
SenA1, SenA2 et SenA3	Sénonien argileux à spongiaires
AiIL1, AiIL2 et AiIL3	Basses terrasses alluviales de la Loire
AiIV1 et AiIV2	Basses terrasses alluviales de la Vienne

Tableau 1 : Significations des abréviations des types de sol.

Simulations effectuées

Les simulations ont été réalisées sur l'année en considérant les données météo de l'année précédente pour initialiser le système et réaliser la période de dormance. Pour chaque modalité, les premières variables demandées en sorties ont été : le rendement, le poids de bois de taille, les dates des stades phénologiques et les teneurs en eau des baies. L'étude de ces premières sorties a permis d'évaluer

le modèle sur des variables pour lesquelles il existait des observations et mesures, ce qui a déterminé si le modèle nécessitait d'être encore paramétré et de détecter les éventuelles erreurs dans les bases de données des itinéraires techniques et météo. Suite à cette première utilisation de STICS, des sorties complémentaires ont été demandées : indice de surface foliaire (LAI : leaf area index), valeurs des réserves, indices de stress hydrique, potentiels de bases simulés, teneurs des baies en sucre et azote, données liées aux bilans hydriques.

Comparaison simulé vs. réel

Les données calculées par STICS sont corrélées et comparées avec celles observées afin de déterminer les écarts entre la réalité et la simulation. Les dernières modifications prises en considération datent du 11 juillet 2006. Les résultats qui suivent correspondent à cette dernière version 6 de STICS.

Utilisation du modèle : Résultats des simulations et discussion

Phénologie

La **date de débourrement** est calculée à partir du modèle BRIN (García de Cortázar Atauri, 2006). Les premières simulations effectuées nous ont orienté à forcer les dates de débourrement pour partir sur de bonnes bases de simulations. En effet, les dates de débourrement étaient assez bien simulées pour 2004 ; pour 2003 les dates simulées étaient antérieures aux dates réelles et pour 2005 il y avait de gros écarts, 19 jours en moyenne (de nouvelles simulations ont été réalisées depuis avec la dernière version de STICS-vigne à ce jour et de tels écarts sont toujours présents). Les **dates de floraison** simulées avec la date de débourrement forcée correspondent assez bien à la réalité, les écarts sont compris entre -1 et +11 jours, ce qui permet d'avoir une indication sur la précocité du cycle. STICS ne calcule pas une **date pour la véraison**, la date considérée pour l'instant est la date correspondant à la fin de la croissance foliaire calculée. Ces dates présentent toutefois des écarts avec les dates réelles de véraison : 15 jours en moyenne pour 2004 et 2005, 5 jours pour 2003 ; la prise en compte de cette date correspondrait mieux dans le cas d'une année chaude et sèche où par simulation la vigne atteint la fin de la croissance foliaire plus tôt, ce qui correspond plus aux conditions méridionales qu'au Val de Loire. Dans le cas de l'étude, la **date de récolte** a été forcée afin de pouvoir comparer les valeurs mesurées sur le terrain avec les sorties du modèle au même moment. STICS peut simuler cette date de récolte en se basant sur la teneur en eau des baies souhaitée, il ne prend toutefois pas encore en compte les facteurs qui peuvent décaler la vendange : situation phytosanitaire ou pluies par exemple.

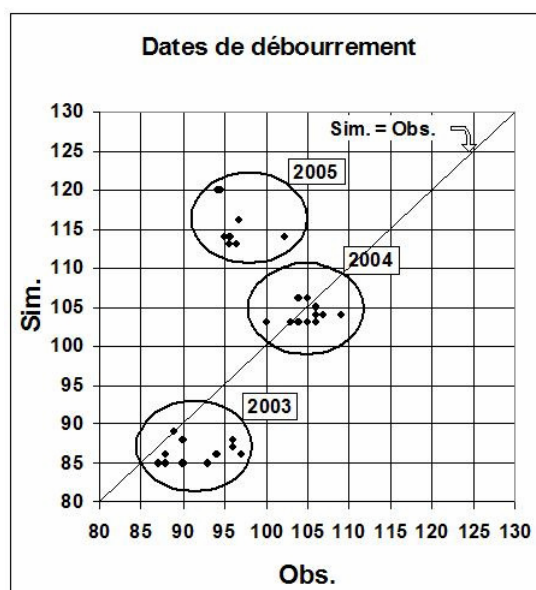


Figure 1 : Comparaison des dates de débourrement simulées et réelles (en jours juliens).

Rendements et stress hydriques

Toutes parcelles et années confondues, les **rendements** simulés varient entre 3,51 T/ha (AIIV3 en 2003) et 12,58 T/ha (SenS1 en 2003) et présentent de manière générale une sous-estimation par rapport à la réalité (2 T/ha en moyenne). Les rendements moyens sur la période 2003-2005 les mieux simulés sont ceux des parcelles SenS1, SenS2 et SenA3. AIIV2 présente quelle que soit l'année la plus forte sous-estimation. Pour toutes les parcelles, les rendements de l'année 2005 sont les plus sous-estimés. En 2004,

SenS3 et AIIV2 présentent des écarts importants ; par la simulation SenS3 a un rendement similaire à celui de SenS1 alors que dans la réalité son rendement est moitié moins élevé (6,72 T/ha et 12,3 T/ha). Les écarts de rendements simulés entre les parcelles proviennent essentiellement de différences de stress hydrique : les parcelles qui présentent les plus forts indices de stress hydriques simulés sont les parcelles qui ont les rendements simulés les plus faibles.

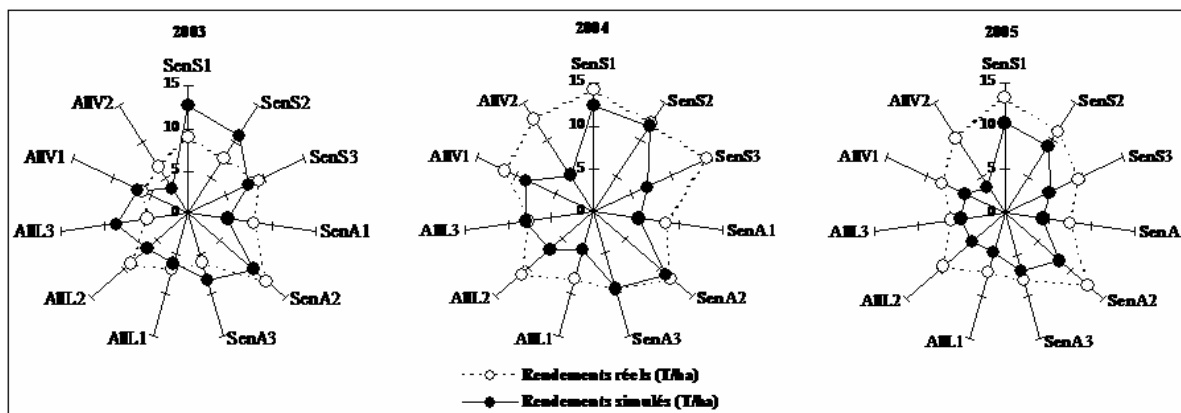


Figure 2 : Comparaison entre rendements simulés et réels.

Le modèle simule un **indice de stress hydrique** (SWFAC) qui est le rapport entre l'évapotranspiration réelle de la vigne et l'évapotranspiration maximale, il s'apparente au rapport ETR/ETM. Cet indice traduit un état de sécheresse du sol puisque la plante étant en stress hydrique va stopper ses pertes d'eau par évaporation. Lorsque SWFAC est proche de 1, il n'y a pas de stress hydrique. Les parcelles qui présentent le plus de stress hydrique par la simulation sont AIIV2, AIII2, SenS3 et SenA1. La figure 3 ci-dessous présente pour chaque parcelle l'écart à la moyenne. Le stress hydrique important de AIIV2 peut s'expliquer par la faible réserve d'eau maximale simulée utilisée par la plante (30 mm contre 90 mm en moyenne). Les écarts 'rendements simulés /rendements réels' et l'indice de stress hydrique SWFAC sont bien corrélés : $r = 0,82$ (significatif au seuil de 1% pour $r > 0,43$) avec un coefficient de détermination de 0,67, toutes modalités confondues.

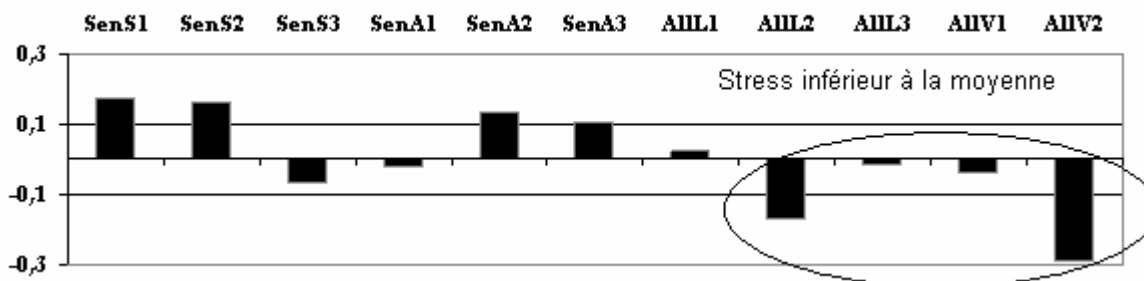


Figure 3 : Ecart du stress hydrique de parcelle (SWFAC, indice de 0 à 1, 1 traduisant une absence de stress hydrique) par rapport au stress hydrique moyen.

Il apparaît ainsi que les parcelles censées être des répétitions ne le sont pas suivant STICS. La difficulté correspond notamment à la prise en compte dans le modèle d'une profondeur maximale d'enracinement, déterminée par fosses pédologiques, alors que certaines racines plus plongeantes peuvent contribuer de manière significative à l'alimentation hydrique de la vigne.

Poids de bois de taille

Lors du paramétrage de cette version de STICS, la valeur de matière sèche totale est paramétrée sans tenir compte des valeurs des réserves de la plante, alors que le modèle lui, prend en compte les réserves dans ces calculs. Les valeurs de paramétrage étant inférieures à la réalité, les valeurs de sorties le sont aussi. Les valeurs simulées de poids de bois de taille sont effectivement très inférieures à la réalité, 0.68 T/ha simulé contre 1.82 T/ha dans la réalité.

Indice de surface foliaire

Les parcelles SenS1, SenS2 et SenA2 (Sénonien sableux et argileux) présentent les valeurs de LAI simulées les plus élevées. LAI et poids de bois de taille (sous-estimé de manière générale) sont fortement corrélés, $r = 0,99$ et $r^2 = 0,98$, ce qui semble logique. Les LAI sont également corrélées au rendement ($r = 0,91$ et $r^2 = 0,83$) en prenant les moyennes de 2003 à 2005, les parcelles présentant les LAI les plus élevées sont les parcelles ayant également les rendements simulés les plus importants.

Teneur en eau et degré d'alcool probable

Les résultats des simulations sont proches de la réalité, l'écart constaté est au maximum de 3%, la moyenne des écarts sur les onze types de sol est de 0% sur l'ensemble des années et de 1% par année. L'INRA d'Avignon ayant établi un lien entre la teneur en sucre de la baie et cette teneur en eau. STICS permet une bonne estimation de la teneur en sucre et ainsi du degré d'alcool probable à la récolte.

Effet millésime

Par des analyses de variance, STICS est évalué quand à sa possibilité de traduire l'effet millésime. En considérant le facteur rendement, lorsque l'on réalise une ANOVA avec les rendements réels de 2003 à 2005 ($F_{obs} = 6,03 > F_{critique} = 3,32$), l'année 2004 se distingue des autres par un rendement plus élevé. Lorsque la même ANOVA est réalisée avec les rendements simulés par STICS ($F_{obs} = 1,79 < F_{critique} = 3,32$), aucune année ne se distingue. Concernant la même démarche avec les teneurs en eau et ainsi indirectement avec les teneurs en alcool probable, une analyse de variance sur les résultats de la simulation traduit un effet millésime tout comme l'analyse sur les données réelles. Ceci est lié au fait que les simulations de rendements nécessitent des améliorations contrairement aux simulations de teneurs en eau des baies proches de la réalité.

Bilan

STICS était utilisé pour la première fois spécifiquement sur les bases de données propres au Val de Loire. Il apparaît que le fonctionnement de la vigne sur certaines parcelles est mieux simulé que sur d'autres. Après modifications sur les paramétrages liés à la culture il a été émis l'hypothèse que, si les résultats obtenus sont loin de ceux attendus, l'origine en est le sol d'où la nécessité de déterminer avec précision les paramètres liés à ce dernier pour les prochaines utilisations de STICS. Le modèle est apte à bien simuler le fonctionnement de la vigne au niveau national : des simulations sur la vigne à partir de bases de données nationales à l'INRA d'Avignon ont donné des résultats satisfaisants (García de Cortázar, 2006), les erreurs de prédiction étant gommées dans la masse de résultats. A l'échelle de la parcelle, il est nécessaire encore de l'adapter. Il peut y avoir deux types d'erreurs de simulation : les sous ou sur-estimations générales provenant du modèle et celles ponctuelles issues de variables d'entrées différentes de la réalité. Lorsque STICS est utilisé à l'échelle locale, il faut minimiser ces "erreurs ponctuelles", d'où la nécessité de connaître du mieux que possible les conditions géopédologiques et météorologiques de la parcelle à étudier. La présence d'enherbement (courante en Val de Loire), le mode de taille, l'effet du type de porte-greffe et la pente des parcelles devront être intégrés au modèle. Une fois STICS bien paramétré pour le Val de Loire, son utilisation devrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement de la vigne. Certaines relations établies par la modélisation pourraient être ensuite validées par la mise en place d'expérimentations à la parcelle, ce qui permettrait au final de raisonner au mieux les choix techniques. Une des perspectives de l'utilisation de STICS serait peut-être de réaliser une cartographie des sorties du modèle qui pourrait être superposée aux atlas cartographiques des unités de terroir (Morlat, 1996).

Références

- García de Cortázar Atauri I. (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'École Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier., 349ppp.
- Morlat R. (1996) Eléments importants d'une méthodologie de caractérisation des facteurs naturels du terroir, en relation avec la réponse de la vigne à travers le vin. *Les Terroirs Viticoles: Concept, produit, valorisation, 1er Colloque International (Angers, France)*, pp. 17-31.

APPORT DE LA TELEDETECTION POUR AMELIORER LA MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES PRINCIPALES CULTURES EN CRAU

USE OF REMOTE SENSING DATA TO IMPROVE CROP MONITORING IN THE REGION OF « CRAU-CAMARGUE »

D. Courault*, F. Ruget, M. Weiss¹, V. Desfonds, N. Bertrand, O. Marloie, JF Hanocq,
G. Sappe, E. Kpemlie, F. Szucs, O. Hagolle²

INRA, URM CSE, domaine St Paul, Site Agroparc, F-84914 Avignon, ¹ Noveltis, ² CNES Toulouse
[*courault@avignon.inra.fr](mailto:courault@avignon.inra.fr)

Introduction

La gestion de l'eau à l'échelle d'une petite région agricole est un problème qui devient de plus en plus préoccupant. Il est devenu primordial ces dernières années en raison du changement climatique. En effet, les périodes de sécheresse sont de plus en plus longues et surviennent à des stades clés du développement de nombreuses cultures. Il apparaît donc crucial de pouvoir suivre avec précision l'état hydrique des surfaces afin de pouvoir mieux contrôler les apports d'eau. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à mieux comprendre le fonctionnement d'une petite région « La Crau – Camargue » dont la production agricole est actuellement fortement dépendante de la ressource hydrique. Les deux couverts les plus représentés sont respectivement les prairies irriguées avec plus de 35% de surface couverte et le blé oscillant entre 25% et 30% suivant les années, le reste de la surface correspondant essentiellement à du riz et des vergers.

Les prairies permanentes sont une culture pérenne, elles sont irriguées par submersion. Elles fournissent une production de foin de grande qualité, à cause de leur composition floristique et de leur rapidité de séchage. Leur maintien à terme pose plusieurs questions de productivité et de consommation d'eau. En effet, les excédents d'eau apportés aux prairies sont majoritairement drainés et alimentent des nappes, qui elles-mêmes alimentent en eau des réseaux industriels ou domestiques. Le chiffrage précis des retours d'eau d'irrigation à la nappe, ainsi que sa variabilité en fonction des techniques (irrigation plus ou moins intense) passe par une bonne connaissance des consommations de la prairie via le processus d'évapotranspiration.

Les cultures de blé pratiquées dans la région montrent une très grande variabilité dans les conduites (bio ou non, irriguée ou non) et les variétés. Les rendements sont généralement faibles, à la fois en raison du sol peu profond et caillouteux ne permettant pas d'avoir une réserve suffisante tout au long du cycle cultural, et des aléas climatiques extrêmes qui surviennent de plus en plus souvent ces dernières années (longues périodes de sécheresse au printemps, épisodes pluvieux intenses, ou longues périodes de mistral ...).

Le fonctionnement de ces cultures, s'il est modélisé avec un modèle de culture, tel que le modèle STICS, permet d'estimer production, consommation et pertes d'eau et d'azote, toutes informations qu'il est intéressant de connaître pour estimer les impacts environnementaux des pratiques et analyser des scénarios de changements climatiques. Le modèle STICS a déjà été employé sur le blé et la prairie dans de nombreuses situations. Cependant, plusieurs points restent à affiner ou à améliorer pour rendre les estimations plus fiables, notamment dans le cas de la région Crau-Camargue. Le comportement des cultures est en effet assez différent de ce que l'on a l'habitude d'analyser dans des expérimentations agronomiques, où il est rare que tous les facteurs limitants soient rassemblés dans une même parcelle (peu d'intrants, milieu assez défavorisé (sol peu profond, réserve utile faible, peu ou pas d'irrigation pour le blé par exemple, et peu d'apport d'engrais). Cette situation représente une réalité de terrain qu'il est important d'étudier afin d'évaluer la possibilité de simuler ces situations, la question sous-jacente étant celle de la robustesse des fonctions utilisées dans le modèle ou du risque de fragilité du modèle pour quelques fonctions particulières.

Le second point important porte sur l'estimation de la variabilité spatiale régionale des pratiques agricoles (date de semis, des apports d'eau ou d'azote, dates des coupes pour les prairies) et de la description de la dynamique des couverts tel que l'évolution de l'indice foliaire pour chaque parcelle dans le paysage. De nombreux travaux ont montré que la télédétection pouvait être utilisée pour répondre à un certain nombre de ces points : l'estimation du LAI à partir de mesures acquises dans le domaine optique est à présent une méthode classique et relativement fiable pour le suivi de la dynamique des couverts (Weiss *et al.*, 2002). Des méthodes d'assimilation de données de télédétection ont montré que l'on pouvait retrouver des dates de semis (Moulin *et al.*, 2003) des doses d'irrigation (Oliosio *et al.*, 2005) ou des conditions initiales de statut azoté dans le sol (Guérif *et al.*, 2005). La plupart de ces études se sont intéressées au blé, dans des conditions d'environnement plutôt favorables (au nord de la France). Suivant les caractéristiques des satellites utilisés, certaines informations sont accessibles avec plus ou moins de précision. Jusqu'à ces deux dernières années, la résolution spatiale (ou taille du pixel) était inversement proportionnelle à la résolution temporelle : les capteurs qui délivraient des informations avec une fréquence temporelle élevée (par exemple tous les jours) avaient une résolution spatiale faible (pixel de 1km) qui ne permettaient pas de descendre à

l'échelle de la parcelle. Avec l'arrivée de nouveaux satellites tels que FORMOSAT (une image tous les 3 jours à 8 m de résolution), cette relation s'est inversée et il devient possible d'aller plus loin pour renseigner les modèles de fonctionnement (Duchemin *et al.*, 2007). Une expérimentation a eu lieu en 2006 sur la région Crau-Camargue, avec l'acquisition d'images multi-capteurs, parallèlement à un suivi de mesures biologiques sur différentes cultures dont des parcelles de blé et de prairie. Ce travail présente les premiers résultats obtenus sur ces deux cultures avec le modèle STICS et la démarche d'utilisation des données de télédétection pour améliorer la modélisation du fonctionnement des couverts à l'échelle régionale de la Crau.

Matériels et méthodes : expérimentation Crau-Camargue, les mesures & les images de télédétection acquises

Une expérimentation a été conduite de mars à septembre 2006 sur une petite zone de la région Crau-Camargue (5x15 km). 5 postes météorologiques ont été installés dans des environnements différents choisis de façon à couvrir les situations les plus fréquemment rencontrées dans la région. Sur chacun de ces sites, des mesures météo (tableau 1) ont été effectuées à 2 m au dessus du couvert et enregistrées toutes les 10 mn. Des mesures biologiques ont complété ce dispositif : prélèvements pour mesures planimétriques, estimation de biomasse, photos hémisphériques pour mesurer le pourcentage de couverture du sol, et de manière indirecte, le LAI par le logiciel can-eye¹. Des analyses d'azote ont été effectuées à la fois dans le sol et dans la plante. Des enquêtes sur les itinéraires techniques ont été menées sur l'ensemble des parcelles de la région étudiée. 2 parcelles de blé (variété Acalou) ont été suivies. Elles sont menées en agriculture biologique depuis 2 années ce qui implique l'apport d'engrais organiques (13% azote organique total, anhydride phosphorique total P205 1%, oxyde de potassium K20 0.2-0.5%) (60 kg/ha apporté). Une des parcelles (p302) est située dans un environnement plutôt humide proche de marais. Elle a été faiblement irriguée (20mm en avril) et a été semée presque 1 mois plus tard que la seconde parcelle (p324) située dans un environnement plus sec.

N°(id)	Site	Descriptif-caractéristiques	Mesures -période
1	Blé (Acalou) parcelle n°324	30ha près d'un bois, semé le 19/11	16/3-30/6 :Ts,Ta,a,UHR
2	Blé (Acalou) parcelle n°302	10ha près de la route semée 15/12	16/3-30/6 :Rg,a,Ta,HR,U
3	Prairie irriguée	30ha, irriguée tous les 11 jours	3/4-/28/9 :Ts,Ta,HR,U,a
4	Maïs	200x500m semé le 5/5-ensilage8/9	17/5-22/8Ta,HR,U,a
5	Riz	semé le 27/4 (4ha)	27/4-28/9 :Ts,Ta,HR,U,a,

Tableau 1 : Descriptif des stations météo installées (Ts: température de surface mesurée avec un radiothermomètre KT15, Ta: température de l'air, HR: humidité de l'air, U: vitesse du vent, a : albedo)

En complément de ce suivi météo continu de mars à septembre, des mesures ponctuelles des principaux flux de surface ont été effectuées à l'aide d'anémomètres soniques 1D à certaines périodes, simultanément à des mesures de profils atmosphériques effectuées à partir d'un ballon captif et à des acquisitions d'images à l'aide de caméras aéroportées (opérant dans les domaines spectraux du visible, proche infrarouge (caméra Xybion) à infrarouge thermique (FLIR), et de plusieurs satellites ayant des caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles différentes : ASTER (1 image tous les 16 jours avec une résolution de 15 m dans le visible (Vis)-proche infrarouge (pIR), 90 m dans le thermique (IRT), Landsat5 (30 m Vis pIR 120 m-IRT), FORMOSAT (tous les 3 jours, 8 m dans le Vis-pIR). Suivant l'ennuagement et les dates de programmations choisies, on dispose approximativement d'une image par mois pour ASTER et Landsat (14/4-30/4-1/6-25/6-8/6-3/7/10/7-26/7) et d'une série de 32 images claires de mars à octobre avec FORMOSAT².

Résultats obtenus sur le blé

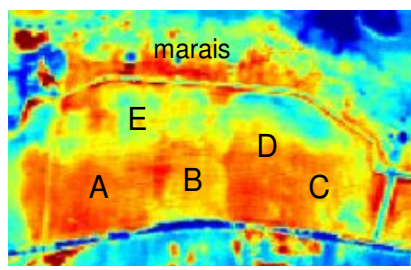
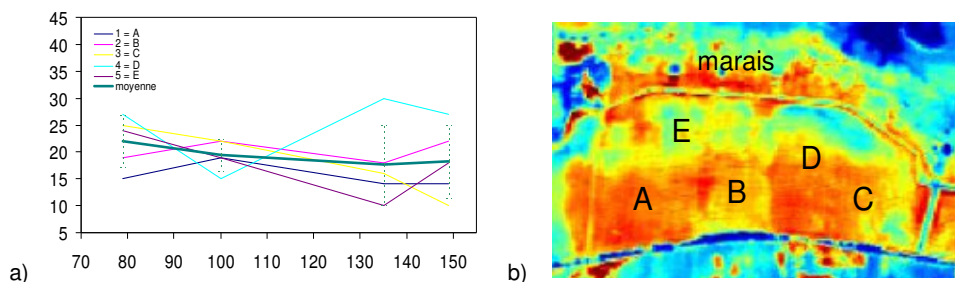


Figure 1 a) : mesures de densité effectuées sur la parcelle de blé 302 montrant la variabilité obtenue suivant les 5 emplacements de prélèvements. B) Localisation de ces placettes sur une image thermique prise avec la caméra aéroportée le 30 avril 2006 (3.5m de résolution)

¹ Can-eye : http://www.avignon.inra.fr/can_eye/, ² Images @NSPO2006 distribution SPOT image

L'analyse des mesures biologiques a montré une très grande hétérogénéité des cultures de blé qui s'exprime sous forme d'une très grande variabilité de la densité en particulier dans les prélèvements comme le montre la figure 1a. Cette hétérogénéité n'était pas visible à l'œil en début de mise en place du couvert lors du choix des placettes mais elle ressort bien sur l'image thermique (figure 1b) qui montre que la placette E par exemple, se situe dans une zone plus influencée par les marais situés au nord de la parcelle avec un sol et un environnement plus humide que les autres placettes, ce qui peut expliquer un comportement différent des autres emplacements. Ce type d'information peut être utilisé pour guider le choix de l'échantillonnage en début d'expérimentation, ou bien permettre de faire des zonages pour simuler chaque partie indépendamment avec ses propres paramètres.

La comparaison des valeurs de LAI et de biomasse mesurées entre les 2 parcelles fait apparaître un décalage marqué sur les premiers stades de développement, dû principalement au décalage de 1 mois des dates de semis (fig 2b). Cet écart diminue en fin de cycle. La parcelle 302 a un développement plus important que la parcelle 324, une différence de hauteur du couvert surtout notable à partir du jour 500 (15 mai), un LAI nettement plus élevé dès fin avril (stade dernière feuille) et par la suite une biomasse plus forte, même si les intervalles de confiance se chevauchent.

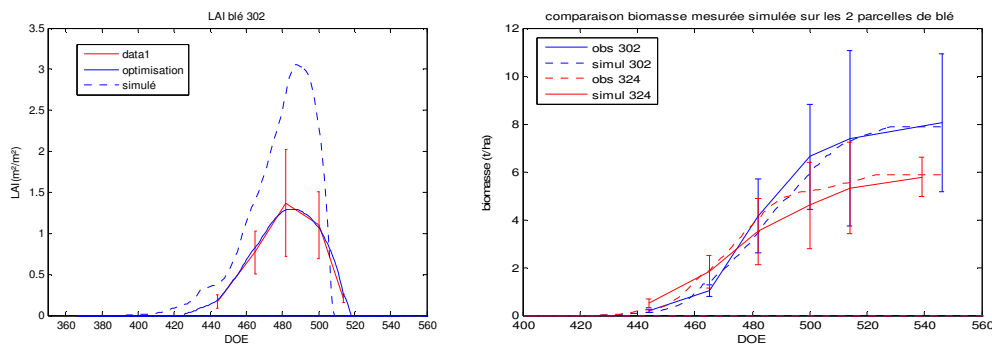


Figure 2 : Résultats des simulations STICS obtenus pour le LAI (a) et la biomasse (b) sur les parcelles de blé

Les valeurs de LAI (< 2.5) et de rendement (2.08t/ha pour la parcelle p324 et 3.68t/ha pour p324) sont faibles. Ceci est dû au fait que l'année climatique correspondant au cycle du blé Acalou a été très sèche par rapport aux années précédentes : 186.5 mm contre 328 mm en moyenne sur les 10 années précédentes. De plus il y a eu un déficit de précipitation sur une longue période au printemps (du 21/2 au 7/5), période importante pour le développement des cultures. Il y a eu plus de 137 jours (sur 303) avec des vents forts de plus de 3m/s (avec fin avril début juin plusieurs journées avec un vent moyen de plus de 5m/s).

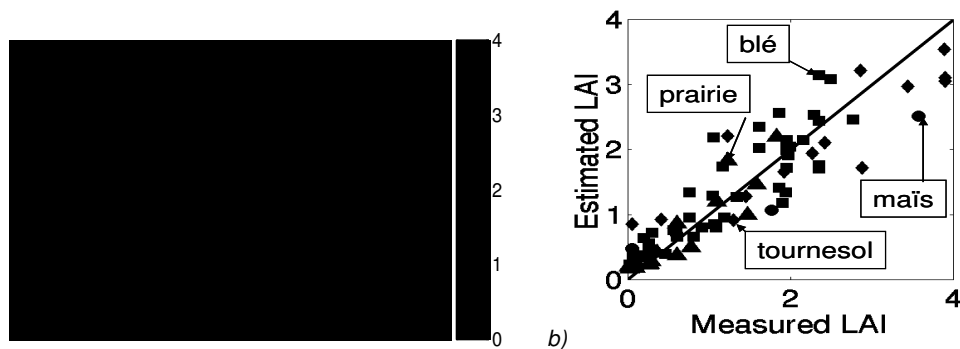


Figure 3 a) : Carte de LAI obtenue à partir de la méthode de réseaux de neurones appliquée à l'image ASTER du 26/7/2006 sur la Crau b) Validation de la méthode sur divers couverts (Weiss et al,2002)

Ces conditions ne sont pas favorables pour obtenir des rendements excellents, d'autant plus que les parcelles suivies n'ont pas été irriguées (ou très peu, seulement 20 mm apportés à la parcelle 302), et ne reçoivent que des engrais biologiques en faible quantité. Par ailleurs, les sols sont très peu profonds, ce conduit à des stress hydriques et azotés importants sur les 2 parcelles.

Les simulations obtenues avec le modèle STICS (paramétré pour des conditions standards sans forçage) ont montré une surestimation systématique et forte du LAI et par suite de la biomasse (fig 2a). Lorsque l'on force le modèle avec des valeurs de LAI interpolées à partir de mesures, les résultats sont satisfaisants pour les 2 parcelles (fig 2b) .

Pour reconstruire correctement l'évolution du LAI, il est nécessaire d'avoir des mesures à des périodes clés du développement du blé. Cette estimation peut être effectuée à partir d'images de télédétection acquises dans le visible et proche infrarouge (comme le montre la figure 3) en utilisant une méthode basée sur les réseaux de neurones (Weiss et al, 2002). Cette méthode a été validée sur de nombreux couverts et donne des résultats satisfaisants (fig3b).

Résultats sur la prairie irriguée

Si les résultats précédents montrent qu'il suffit de peu de données (mais à des dates bien spécifiques) pour reconstruire l'évolution temporelle du LAI du blé, la figure 4a montre que la situation devient plus complexe pour le suivi des prairies irriguées. En effet la dynamique du LAI est pilotée par de nombreux facteurs dont les principaux sont les irrigations et les coupes. Si l'on dispose de peu de mesures, plusieurs choix d'interpolations sont possibles (utiliser un modèle linéaire privilégiant une croissance progressive rapide, ou un modèle exponentiel similaire à celui du blé). La figure 4b montre que les résultats sont significativement différents suivant les stratégies choisies. Il est donc crucial de pouvoir bien simuler la dynamique du LAI pour estimer correctement la biomasse et l'évapotranspiration des prairies. Cet objectif apparaît réalisable à partir des images FORMOSAT qui présentent une résolution temporelle élevée (la fig4c montre la position des images acquises sur la Crau par rapport à la simulation du LAI de la prairie). La détection des dates de coupes et l'estimation du LAI par la méthode décrite précédemment paraît possible. Un travail est en cours actuellement sur cet aspect.

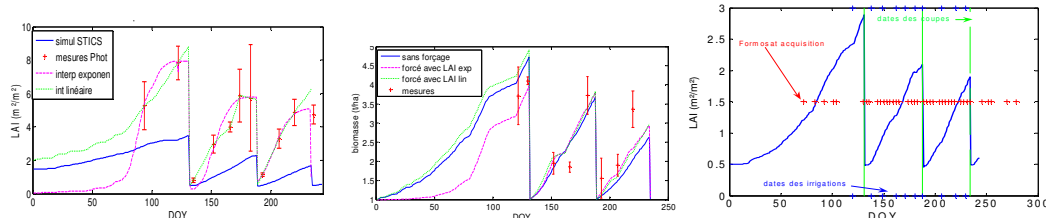


Figure 4 a) Simulations du LAI (trait gras) de la prairie irriguée suivant différentes stratégies d'interpolation (linéaire : en pointillé, exponentielle : en tiret) b) impact de ces LAI sur l'estimation de la biomasse simulée par STICS c) localisation sur le LAI des dates d'acquisition d'images FORMOSAT par rapport aux principales interventions de la prairie.

Conclusion

Les premiers résultats obtenus sur la région de la Crau soulignent :

- 1) une forte hétérogénéité spatiale qui peut être évaluée grâce aux images de télédétection (acquises notamment dans le domaine thermique). L'analyse des images peut guider le choix de l'échantillonnage et permettre de faire des zonages avec des paramètres adaptés à chaque situation.
- 2) des résultats satisfaisants obtenus par STICS pour le blé en conditions très limitantes (fort stress hydrique, faible fertilisation), à condition de l'utiliser en mode forcé par le LAI,
- 3) la haute résolution spatiale et temporelle d'images apparaît nécessaire si l'on veut caractériser correctement les prairies (pratiques et LAI), ce qui semble réalisable à partir des données FORMOSAT et du futur capteur Venüs dont les caractéristiques sont similaires.

Références

Duchemin B., Hagolle O., soumis. Agrometeorological study of semi-arid areas: an experiment for analysing the potential of time series of FORMOSAT-2 images (Tensift-Marrakech plain). *International Journal of Remote Sensing*.

Guéris M., Houlès V., Mary B. (2005) A tool devoted to recommend spatialised nitrogen rates at the field scale, based on a crop model and remote sensing observations assimilation. *3rd International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture*, Beijing China, Oct.14-16, 2005.

Moulin S., Guéris M., Baret F. (2003) Model inversion procedure for retrieving wheat biophysical variables from hyperspectral measurements. *IEEE international geoscience and remote sensing symposium; Piscataway NJ (USA) Toulouse (FRA); 2003/07/21-25*. 3p.

Olioso A., Inoue Y., Ortega-Farias S., Demarty J., Wigneron J. P., Braud I., Jacob F., Lecharpentier P., Ottlé C., Calvet J. C., Brisson N. 2005. Future directions for advanced evapotranspiration modeling: assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems*. 19 (3-4): 377-412

Weiss M., Baret F., Leroy M., Hautecoeur O., Bacour C., Prévot L., Bruguier N. (2002) Validation of neural net techniques to estimate canopy biophysical variables from remote sensing data. *Agronomie: Agriculture and Environment*, 22: 547-553.

E. Debove*, P.A. Jayet

INRA, UMR Economie Publique, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon

*elodie.debove@m4x.org

Introduction

Le couplage d'un modèle de croissance des plantes tels que STICS à un modèle économique permet de prendre en compte les modifications de l'environnement physique dans l'analyse économique. Visant cet objectif, le modèle STICS a été couplé de façon externe au modèle économique d'offre européenne agricole AROPAj (De Cara et Jayet, 2000). Ce couplage contribuera à évaluer les conséquences économiques du changement climatique sur l'agriculture européenne, en particulier sur les marges agricoles, les productions et les émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole.

Dans ce papier, nous abordons l'impact du changement climatique sur les rendements des cultures à travers les "courbes de réponse". Après un rappel rapide de la méthodologie utilisée, nous présenterons les premiers résultats obtenus à l'échelle de la France.

Méthodologie

AROPAJ

Le modèle économique AROPAj est un modèle d'offre (les prix sont exogènes). Nous l'avons utilisé dans la version élaborée à partir du RICA européen 2002. Les 1074 agents économiques associés au modèle sont des groupes d'exploitants agricoles virtuels, représentatifs de l'activité agricole au sein de chacune des régions RICA. Le modèle exclut les activités de maraîchage, d'horticulture et de la vigne. Chaque agent économique maximise son profit sous un ensemble de contraintes technico-économiques (contraintes de la politique agricole commune, mais également contraintes de rotation, et d'alimentation animale) :

$$\begin{aligned} \max \Pi_k(x_k) &= \max g_k x_k \\ \text{s.t. } A_k x_k &\leq z_k \\ x_k &\geq 0 \end{aligned}$$

Dans ce programme, x_k est le vecteur à n dimensions des activités de production du groupe-type k, g_k est le vecteur des marges brutes, A_k est la matrice des contraintes et z_k est le vecteur des ressources.

Les résultats présentés ne concernent que la France.

Associer une fonction de réponse " azote –rendement " à chacune des cultures présentes chez chacun des groupes-types d'exploitation agricole

Dans la version initiale du modèle AROPAj, les agents économiques ont des rendements fixes. Ils ne peuvent jouer sur les intrants azotés pour les modifier. Une méthodologie a été mise en place au cours d'un travail de thèse (Godard, 2005) afin de substituer à ces rendements des courbes de réponse à l'azote. Le modèle STICS a été utilisé pour la construction de ces courbes (voir les posters " ARTIX " par Novello et Zakharov, et " Automatisation et génération de courbes de réponse à l'azote par Zakharov et al, présentés lors des journées STICS 2007).

Un des intérêts de l'introduction de ces courbes est que pour chacune d'entre elles, nous connaissons les entrées STICS associées, en particulier le type de sol, l'itinéraire technique, le climat étant celui de l'année du modèle (2002 dans notre cas).

Introduction du changement climatique

Les entrées STICS étant précisées pour chaque agent économique et chaque culture, il est désormais possible de prendre en compte l'impact du changement climatique sur les courbes de rendement en réponse à l'apport d'azote. L'impact du changement climatique sur les rendements des cultures est ainsi introduit dans le modèle AROPAj, permettant d'en évaluer les conséquences économiques.

Le scénario de changement climatique utilisé correspond au scénario B2 du GIEC (scénarios SRES). Cela correspond à un monde où l'accent est mis sur des solutions locales en matière de viabilité

économique, sociale et environnementale. Ce monde se caractérise par une population mondiale qui augmente “ régulièrement ”, par un développement économique de niveau “ intermédiaire ” et par un progrès technologique “ divers ”. Ce scénario est également axé sur la protection de l'environnement et l'équité sociale et privilégie l'approche locale et régionale. Le réchauffement moyen prévu pour ce scénario est de 2,2°C. On le qualifie souvent de scénario optimiste.

Les hypothèses économiques utilisées correspondent à la PAC de 2002, c'est-à-dire avant la réforme de Luxembourg. Les prix, la structure agricole des exploitations sont également datées de 2002. Les résultats présentés ne supposent aucune adaptation des exploitants aux nouvelles conditions climatiques (cultures, variétés, date de semis, irrigation identiques, toutes conditions par hypothèse identiques à celle de 2002)

Résultats de l'introduction des fonctions de réponse en situation de changement climatique

Rendements

Sont ici présentés les premiers résultats obtenus après l'élaboration des courbes de réponse par STICS pour les exploitations agricoles types de la France, et pour les principales cultures présentes en 2002, dans la version du modèle AROPAj développée pour le programme européen GENEDEC (STREP-FP6 2004-2007, données FADN 2002).

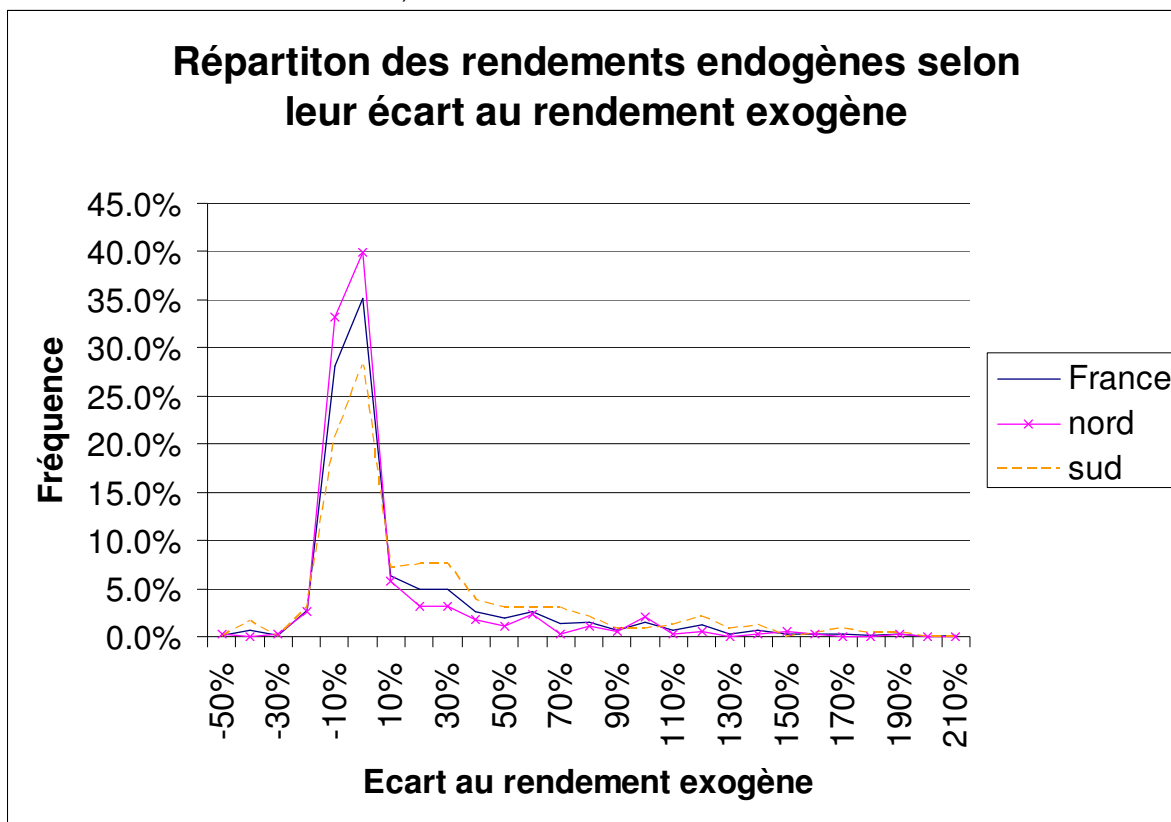


Figure 1 : Effet du changement climatique sur les rendements (distribution des rendements après changement climatique par rapport aux rendements sans changement climatique) en France.

Quand on s'intéresse uniquement à l'impact sur les rendements agricoles (Figure 1), et dans les hypothèses de l'étude (itinéraires techniques identiques), on remarque que les rendements augmentent (en moyenne de +20% en France). L'augmentation des rendements est plus importante au sud qu'au nord (en moyenne, +12,9% au nord contre +27% au sud). Ce résultat peut être surprenant mais doit se comprendre par rapport aux conditions de l'étude (ceteris paribus). Au Sud, la plupart des cultures étaient irriguées et continuent à l'être tandis qu'au Nord elles ne l'étaient pas et souffrent d'un manque d'eau.

Les rendements associés à des conditions de changement climatique étant calculés, il est maintenant possible de les prendre en compte dans le modèle économique AROPAj.

Marges

Conséquence directe de l'impact du changement climatique sur les rendements, les marges des

exploitants simulées par AROPAj augmentent, et davantage au Sud qu'au Nord (tableau 1). Sans adaptation, mais avec maintien de l'irrigation là où elle était déjà en place, les agriculteurs profitent du changement climatique. Des adaptations simples comme des nouvelles variétés et une modification des dates de semis pourraient sans doute encore améliorer leurs revenus. Il serait également intéressant de limiter l'irrigation au sud et de la permettre au nord.

	2002 (en millions d'€)	Scénario B2 (millions d'€)	Scénario B2 (variation en %)
Nord	12'551	13'138	+4,7
Sud	6'845	7'602	+11,1
France	19'397	20'741	+6,9

Tableau 1 : Marges agricoles en France sous l'impact du changement climatique.

Offre agricole

En ce qui concerne les productions vendues, l'évolution des rendements modifie l'intérêt relatif de certaines cultures par rapport aux autres. Les offres de blé tendre, d'orges, de maïs et de tournesol augmentent tandis que celles de blé dur, de colza et de pomme de terre diminuent. Le tournesol profite davantage du changement climatique et remplace le colza. La pomme de terre voit ses rendements fortement diminués du fait d'un manque d'eau.

Ici encore, les résultats souffrent de quelques artefacts : l'impact du changement climatique n'a pas été pris en compte pour l'ensemble des productions. En particulier les rendements des fourrages et des prairies n'ont pas été modifiés. L'augmentation des rendements des céréales diminue le coût relatif de ceux-ci par rapport aux prairies et aux fourrages. L'augmentation de l'offre observée s'explique donc par de meilleurs rendements mais également par une augmentation des surfaces allouées aux céréales. Les résultats montrent par conséquent une diminution des surfaces fourragères, les animaux étant préférentiellement nourris à partir des céréales produites sur l'exploitation. Cette diminution des surfaces fourragères est sans doute à remettre en cause. Dans la réalité, si le changement climatique profite davantage aux fourrages qu'aux céréales, on pourrait observer une augmentation des surfaces fourragères et parallèlement une augmentation de l'offre de céréales (du fait d'une augmentation des rendements).

	France	Nord	Sud
Blé dur	-18%	+58%	-40%
Blé tendre	+75%	+62%	+138%
Orges	+63%	+75%	-2%
Maïs	+16%	+44%	+0%
Colza	-28%	-36%	+0%
Tournesol	+50%	+64%	+0%
Pomme de terre	-30%	-40%	+0%

Tableau 2 : Evolution des productions agricoles en France sous l'impact du changement climatique.

Emissions de gaz à effet de serre

Le modèle AROPAj permet également de mesurer les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine agricole (méthane, protoxyde d'azote). Les émissions sont ici calculées sur la base des coefficients proposés par le GIEC (voir le poster "émissions de N₂O" par Durandea et al). Accompagnant la hausse des rendements, une plus forte consommation d'engrais entraîne une hausse des émissions de N₂O. Encore une fois, les hypothèses de l'étude (ceteris paribus) et en particulier des prix identiques ont une grande influence sur ces résultats.

GES	CH ₄	N ₂ O	Total
CC	+1.30%	+27%	+16%

Tableau 3 : Evolution des émissions de GES agricoles en France sous l'impact du changement climatique.

Conclusion

L'utilisation du modèle STICS couplé au modèle AROPAj permet d'évaluer l'impact économique du

changement climatique à l'échelle européenne. Les résultats présentés ne concernent que la France et montrent que, sans adaptation, à l'échelle française, l'impact est significatif. Les revenus agricoles pourraient en effet augmenter en moyenne de 7%. Cela est dû à l'augmentation des rendements des cultures, augmentation qu'accompagne une augmentation de la consommation d'engrais azotés à l'origine d'une hausse des émissions de N₂O. Les impacts tels que le modèle AROPAj les simulent sont bien différents entre le Sud et le Nord de la France, les exploitations agricoles du Sud profitant davantage du changement climatique selon les hypothèses de l'étude (ceteris paribus). La prise en compte partielle des impacts du changement climatique (uniquement sur les cultures de vente, et non sur les fourrages) est la principale limite des résultats présentés.

Les conséquences du changement climatique sur les exploitations agricoles sont bien entendu additionnelles de l'impact d'une éventuelle régulation. Un des résultats attendus de ce genre d'analyse est une hiérarchisation des effets. Par exemple, il serait intéressant de comparer les conséquences présentées ici, à celles de la dernière réforme de la PAC (Luxembourg, 2003), les échelles de temps pour s'adapter étant bien différentes.

L'introduction de courbes réponses dans le modèle AROPAj peut être généralisée, comme le montrent les travaux de Durandeu et al. (2007). Le modèle AROPAj prenant en compte les courbes de réponses des émissions de N₂O devient plus réactif à son environnement et plus à même d'évaluer les impacts des politiques agri-environnementales. La prise en compte de ces courbes en substitution aux coefficients proposés par défaut par le GIEC modifierait substantiellement les fonctions de coût marginal de réduction des émissions de GES, ce qui se traduirait par une inflexion notable de la régulation. La combinaison des fonctions de réponse "rendement" et "émission de N₂O" offre des perspectives intéressantes de ré-évaluation de l'impact d'une politique de régulation des émissions de GES.

Références

- De Cara S. et Jayet, P.-A. (2000) Emissions of greenhouse gases from agriculture : the heterogeneity of abatement costs in France, *European Review of Agricultural Economics* 75(4): 597–623.
- Durandeu S., Godard C., Gabrielle B., Jayet P.-A. et Lebas C. (2007) Coupling biophysical and micro-economical models to assess nitrous oxide emissions from cropland and the effects of mitigation measures on greenhouse emissions. (soumis à Climatic Change en janvier 2007)
- 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. Thèse de doctorat en Agronomie (Sous la direction de Roger-Estrade, J.) INRA-INA PG, UMR Economie publique, – 278 p.
- Novello N., Zakharov P. (2007) ARTIX, base de données et solution logiciel pour le couplage de STICS et du modèle économique AROPAj, poster présenté aux journées STICS 2007, Reims.
- Zakharov P., Debove E., Novello N., Baranger E. (2007) Automatisation et génération de courbes de réponse à l'azote, poster présenté aux journées STICS 2007, Reims.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au financement du projet de recherche européen GENEDEC (FP6-502184).

UTILISATION DU MODELE STICS POUR LA CONDUITE OPTIMALE DE CULTURES CEREALIERES EN REGION ARIDE (PLAINE DE MARRAKECH/AL HAOUZ)

THE USE OF STICS CROP MODEL TO MANAGE CEREAL CROPS IN ARID REGIONS (HAOUZ PLAIN, MARRAKECH)

R. Hadria*, B. Duchemin, S. Khabba, A. Lahrouni, I. Benhadj, A. Olioso, A. Chehbouni

CESBIO – Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, F- Toulouse

*rachid.hadria@cesbio.cnrs.fr

Introduction

L'agriculture représente l'activité principale de la population marocaine. La céréaliculture occupe une place primordiale et la culture du blé occupe la première place en terme de superficies occupées. Bien que le Maroc ait investi beaucoup dans la recherche sur les blés et que des itinéraires techniques performants et des variétés adaptées aient été développés au sein des centres de recherche agronomique, les rendements moyens du blé restent encore très faibles, de l'ordre de 12-13 quintaux ces dernières années (Karrou, 2003). Ceci est dû principalement à la forte dépendance de l'agriculture aux pluies qui sont très faibles et très variables d'une année à l'autre. En plus, les mauvaises pratiques culturales pratiquées par les agriculteurs affectent énormément la rentabilité de la culture de blé. On note en particulier, le choix des dates de semis, les dates d'irrigation et de fertilisation.

Dans ce contexte, et afin de contribuer à la réussite de la culture du blé dans la région semi aride de la plaine du Haouz de Marrakech, on se propose dans ce travail d'utiliser le modèle STICS (Brisson et al., 1998, 2002, 2003) pour faire une étude par simulation qui nous permettra de choisir les meilleurs itinéraires techniques qui conduisent à des rendements optimaux tout en conservant les ressources hydriques limitées de la région. On cherchera en particulier à répondre aux trois questions suivantes : 1) Comment peut on utiliser STICS pour aider à la gestion d'eau d'irrigation ?, 2) Quelle est la meilleure période de date de semis dans la région de Marrakech ?, 3) Quel est le meilleur calendrier d'irrigation en fonction de la date de semis ?

Région d'étude et données climatiques

Le site d'étude est la plaine du Haouz qui entoure la ville de Marrakech au centre du Maroc. La région est caractérisée par une importante demande évaporatoire (1600 mm/an) et par des faibles précipitations annuelles (~240mm/an). Les céréales sont les cultures principales et le blé est la culture céréalière dominante. Il est généralement semé entre le 1er novembre et le 15 janvier, en début de saison des pluies. Une description détaillée du site est donnée par Duchemin et al. (2006).

On dispose d'une série des données de pluies et de températures de l'air enregistrées entre 1990 et 2004 à la station de marrakech. Les précipitations annuelles varient entre 100 mm pour les années sèches et plus de 300 mm pour les années humides. La variabilité intra annuelle des pluies est également très importante. Par conséquent, la sécheresse peut intervenir à n'importe quel moment du cycle de croissance du blé et causer des pertes considérables en terme de rendement (Watts et El Mourid, 1988, Karrou, 2003). Les pluies tombent principalement durant deux périodes : la période novembre – janvier qui coïncide avec la période de semis et qui est caractérisée par des températures basses, et la période mars - avril qui coïncide avec la période du plein développement de la culture caractérisée par une augmentation notable des températures et du rayonnement solaire. Cette distribution de pluie observée dans la région de Marrakech est aussi représentative d'un grand nombre de régions céréalières au Maroc (Balaghi et al., 2007).

Les températures de l'air sont faibles au début de la saison avec une moyenne de 8°C entre le début novembre et la fin février. Elles sont élevées en fin de saison avec une moyenne de 27°C entre le début avril et la fin mai. En plus des données de pluies et de températures, on dispose des mesures de rayonnement solaire et de la vitesse du vent collectées entre 1991 et 1993 et entre 1998 et 2004 par sept stations réparties dans toute la plaine. En absence de mesures de ces deux dernières variables climatiques pour toutes les années d'étude, nous avons retenu ici une évolution saisonnière moyenne de chaque variable. Ce choix est justifié par le fait que ces variables climatiques ne connaissent pas (en moyenne ou en cumul) de grandes fluctuations d'une année sur l'autre, et que l'effet du vent sur le rendement est négligeable par rapport à celui des stress hydrique et azoté.

Utilisation du modèle STICS dans la région d'étude

Une partie importante de nos premiers travaux a été consacrée à la calibration et à la validation du modèle STICS sous les conditions semi arides. Nous avons d'abord testé le modèle à partir de données

collectées dans la vallée de Yaqui au Mexique (Rodriguez et al., 2004). Nous avons ensuite utilisé les données de terrain et de télédétection collectées dans le cadre du projet SudMed (Chehbouni et al., 2006) pour tester le modèle dans les conditions du Haouz (Hadria et al., 2005, 2006). Ces premiers travaux ont permis de montrer que le modèle fonctionne globalement bien en milieu semi-aride, malgré les spécificités climatiques. Dans un deuxième temps, nous avons testé l'utilisation du modèle STICS comme outil d'aide à la gestion agricole. L'idée était de simuler les dates d'irrigation en fonction d'un seuil (toléré) de stress hydrique. Nous avons donc utilisé l'option d'irrigation automatique du modèle pour critiquer les itinéraires techniques de deux parcelles étudiées durant la saison 2003/2004. L'étude révèle que l'effet du stress azoté est très important dans la zone étudiée. Dans les conditions non limitantes d'azote, les simulations du pilotage d'irrigation du blé par STICS ont mis en évidence les avantages de réaliser des semis précoces dans la région du Haouz pour l'année 2003/2004, relativement bonne en terme de pluviométrie. On se propose donc ici d'étendre ces résultats en travaillant sur les données climatiques collectées à la station de Marrakech pendant une quinzaine d'années.

Le principe méthodologique est simple : le modèle STICS estime un calendrier d'irrigation en fonction de l'état hydrique de la plante. Il simule une irrigation chaque fois que le stress hydrique (appréhendé par le rapport entre l'évapotranspiration réelle et maximale ETR/ETM) atteint un seuil K fixé par l'utilisateur. La question qu'on se pose porte sur le choix de la meilleure valeur de ce seuil K . Nous avons donc effectué un ensemble de simulations pour différentes valeurs de ce seuil entre 0.5 et 1 avec un pas de 0.1 et pour des dates de semis variant entre le 1er novembre et le 15 janvier avec un pas de 2 jours, et cela pour les 15 années climatiques décrites précédemment. Dans ce qui suit, nous allons analyser les résultats de simulations pour répondre aux trois questions posées en introduction.

Dans nos études précédentes (Hadria et al., 2005, 2006), nous avons montré que l'effet du stress azoté est très dominant dans la région de Marrakech à cause des faibles quantités de fertilisants apportées et aussi parfois à cause de la mauvaise date d'apport. L'objet de cette étude est cependant l'utilisation de l'eau pour l'irrigation. D'autre part, les itinéraires optimaux de fertilisation sont relativement bien connus pour le blé. Pour éviter l'interférence des effets des stress hydrique et azoté, nous n'allons pas prendre en compte l'effet de ce dernier stress dans nos simulations en désactivant ses effets dans les simulations.

Résultats et discussions

Analyse des simulations

La figure 1 présente les différents rendements en grains (GY) obtenus pour les différentes dates de semis (SD), pour les six valeurs du seuil k et pour les 14 saisons de blé entre 1990 et 2004. Quel que soit la valeur du seuil k , les rendements en grains ont tendance à augmenter en fonction de la date de semis et à se stabiliser pour les semis tardifs. Dans les conditions de simulation utilisées ici, le rendement en grains dépend en premier lieu du nombre de grains produits. À son tour, ce dernier dépend fortement de la vitesse de production de la biomasse durant les 30 jours qui précèdent le début du stade de remplissage des grains (Brisson et al., 2003). Par conséquent, à niveau de stress hydrique égal, le rendement en grain est fortement corrélé au rayonnement incident, qui est d'autant plus grand durant la période de démultiplication des grains que le semis est tardif. Ceci explique le pourquoi de l'augmentation générale du rendement en fonction de la date de semis. Pour les années très sèches cependant, les rendements tendent à diminuer pour les semis tardifs car le cycle de développement de la plante étant réduit, la quantité de matière sèche produite est diminuée. Or cette quantité détermine le taux de remplissage des grains.

Sur la figure 2, on présente les rendements moyens en grains et en biomasse obtenus pour les 14 saisons agricoles pour les différents niveaux de stress hydrique. On constate que les courbes d'évolution des rendements en grains peuvent être subdivisé en trois parties en fonction de la date de semis : la première partie commence du premier au 15 novembre (DO2Y=320). La seconde période commence du 15 novembre jusqu'au 20 décembre (DO2Y=355). La troisième période commence du 20 décembre jusqu'au 15 janvier (DO2Y=380). Durant la première période, les rendements en grains augmentent linéairement en fonction de la date de semis. La même linéarité dans la croissance est conservée durant la deuxième période mais avec une pente plus faible. A partir du début de la troisième période, les rendements tendent à se stabiliser à des valeurs maximales pour les niveaux faibles de stress et tendent à la décroissance pour les autres niveaux de stress. Lorsqu'on examine les rendements en biomasse (figure 2 à droite), on constate la tendance inverse sur la matière sèche totale produite, qui chute durant la troisième période. Cela s'explique par le raccourcissement du cycle de culture du fait de l'augmentation du rayonnement solaire en cours de saison, cette dernière étant d'autant plus forte que le semis est tardif. Cette augmentation du rayonnement est accompagnée d'une augmentation de la demande climatique (évaporation potentielle) et donc d'une augmentation des besoins en eau et de l'irrigation.

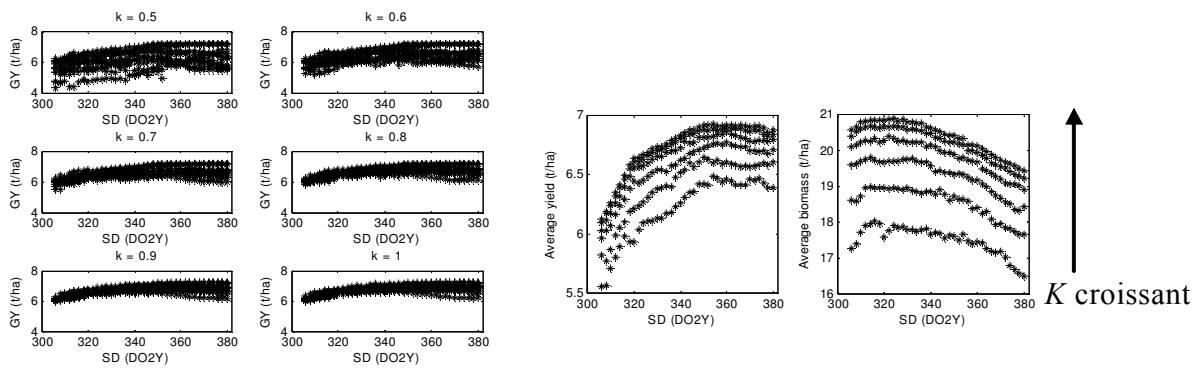


Figure 1 : (les six figures à gauche) : rendement en grains (GY) simulés pour les 14 saisons de blé entre 1990 et 2004 en fonction de la date de semis SD et cela pour les différentes valeurs du seuil k . DO2Y représente le numéro du jour sur 2 années.

Figure 2 : (les deux figures à droite) : Evolution des rendements moyens en grains (figure à gauche) et en biomasse (figure à droite) en fonction de la date de semis pour les 14 saisons de blé étudiées.

Choix de la meilleure valeur du seuil k et de la meilleure période de semis

Les deux figures précédentes illustrent bien l'importance de l'irrigation par la tendance à la stabilisation des rendements vers les valeurs élevées de k , c'est à dire vers les conditions moins stressées. A partir de la figure 2, on conclut que la variation des rendements moyens en fonction de k devient négligeable à partir de la valeur 0.7 ou 0.8 (autour de 6-6.5 t/ha). De plus, les valeurs moyennes de l'écart-type associé aux rendements simulés pour les 14 saisons sont : 0.53 t/ha pour $k=0.5$, 0.47 t/ha pour $k=0.6$, 0.43 t/ha pour $k=0.7$ et $k=0.8$ et finalement 0.42 t/ha pour $k=0.9$ et $k=1$. Sachant que la quantité d'eau d'irrigation augmente avec l'augmentation de k , on conclut donc que la valeur 0.7 du seuil de stress hydrique est un bon compromis pour la stabilisation des rendements et l'économie d'eau.

Sur la figure 3, on présente les rendements en grains et la quantité d'eau d'irrigation simulés en fonction de la date de semis pour trois types d'années : années très sèches, années moyennes et années pluvieuses. Les données présentées ici correspondent aux valeurs moyennes obtenues pour deux années de chaque groupe. On présente le cas de deux valeurs du seuil k : 0.7 et 1. Comme attendu, les rendements en grains ainsi que les quantités d'eau d'irrigation simulés pour le seuil de stress $k=1$ sont toujours supérieurs ou égaux à ceux obtenus pour $k=0.7$. Pour les semis tardifs, les rendements en grains tendent à la diminution durant les années sèches tandis qu'ils tendent à la stabilité pour les années pluvieuses. Les quantités d'eau d'irrigation augmentent avec la tardivité du semis car la demande évaporative de l'atmosphère est nettement supérieure en avril-mai par rapport au début de la saison. En examinant la variation des rendements en fonction de la date de semis et les quantités d'eau d'irrigation pour les années sèches et moyennes, qui sont les plus rencontrées dans la région de Marrakech, on constate que la période de semis qui présente le moins de risque pour les rendements se situe entre les jours 340 et 360 (entre le 5 et le 25 décembre). En effet, pour les semis antérieurs au 5 décembre, les rendements continuent encore à croître. Après cette date, ils tendent à se stabiliser mais risquent de chuter pour les semis postérieurs au 25 décembre. Les quantités d'eau d'irrigation augmentent aussi pour les semis effectués après le 25 décembre.

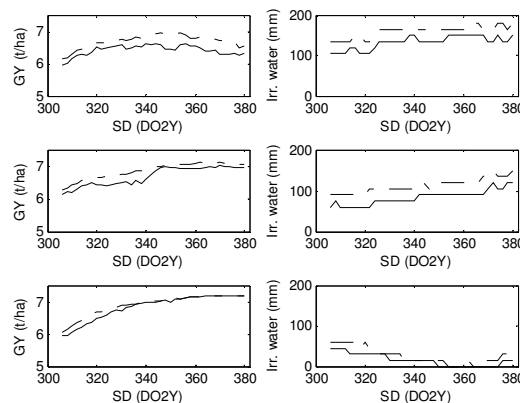


Figure 3 : Les rendements en grains (trois figures à gauche) et les quantités d'eau d'irrigation (trois figures à droite) simulés en fonction de la date de semis pour trois types d'années : années sèches (deux figures en haut), années moyennes (deux figures au milieu) et années pluviales (deux figures en bas). Les traits continus correspondent à $k=0.7$ et les traits discontinus correspondent à $k=1$.

Quand faut-il irriguer ?

Une fois que le seuil du stress optimal et la meilleure période de date de semis sont choisis, on apporte ici quelques éléments de réponses en termes de calendrier d'irrigation. Pour un seuil de stress hydrique k égal à 0.7, le modèle simule en moyenne trois irrigations de 30mm réparties sur tout le cycle de développement en fonction de la date de semis. La première irrigation intervient environ 75 jours après le semis tandis que les dates des deux autres dépendent de la date de semis. L'intervalle de temps entre la première irrigation et la deuxième d'une part, et entre la deuxième et la troisième d'une autre part est d'environ un mois pour des dates de semis antérieures au 25 décembre, tandis que cet intervalle de temps devient plus court pour des dates de semis postérieures au 25 décembre. Cela est dû au fait que pour les semis très tardifs, la phase de plein développement de la culture coïncide avec la période la plus sèche de la saison (mars avril).

Conclusions

Cette étude par simulation a permis d'utiliser le modèle STICS pour aider à la gestion d'eau d'irrigation dans la région semi aride de Marrakech au Maroc. Les réponses apportées aux trois questions posées au départ sont les suivantes :

- un léger stress hydrique (valeur de 0.7) permet d'assurer à la fois un bon niveau moyen et une stabilisation des rendements pour les différentes années climatiques considérées.
- la période favorable pour le semis s'étend de la première à la troisième semaine de décembre. Ces résultats mettent en cause les pratiques de certains agriculteurs qui sèment tardivement en janvier.
- pour un seuil de stress égal à 0.7, le modèle simule en moyenne trois irrigations de 30mm, espacées sur environ 4 mois.

Ces résultats permettent d'apporter des éléments de réponses aux gestionnaires des ressources agricoles et hydriques dans les régions semi-arides du Maroc pour améliorer les pratiques culturales (en particulier les périodes de semis et les calendriers d'irrigation). Ils peuvent également servir à nourrir la discussion sur le choix de cultures économes en eau adaptées à la région de Marrakech.

Références

- Balaghi R. et al. (2007) Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco, *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* (in press), doi:10.1016/j.jag.2006.12.001.
- Brisson N.(2003) An overview of the crop model STICS, *Europ. J. Agronomy*, 18: 300-306.
- Brisson N. (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 : 311-346.
- Chebouni A. et al. (2006) The use of remotely sensed data for Integrated hydrological modeling in arid and semi-arid regions: the SUDMED Program. Submitted to *International Journal of Remote Sensing*.
- Duchemin B. et al. (2006) Monitoring wheat phenology and irrigation in Center of Morocco : on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural and Water Management* 79:1–27.
- Hadria R. et al. (2006) Calibration and validation of the STICS crop model for managing wheat irrigation in the semi-arid marrakech/Al Haouz Plain, *Arabian Journal for Science and Engineering (AJSE)*, special issue "Potential Water Challenges and Solutions in the New Millennium in Arid Regions", in press.
- Hadria R. et al. (2005) Application de STICS à la gestion de l'eau d'irrigation dans les conditions de Marrakech, Deuxième séminaire STICS, 17-18/03/2005, Carry-le-Rouet, France.
- Hadria R. et al. (2003) Etalonnage du modèle STICS pour une culture de blé en condition semi-aride (Vallée de Yaqui, Nord-Mexique). Premier séminaire STICS, 23-24/01/2003, Arles, France.
- Karrou M. (2003) Conduite du blé au Maroc. Rabat, INRA éditions.
- Watts D., El Mourid M., (1988) Rainfall patterns and probabilities in the semi-arid cereal production region of Morocco, USAID projct No.608-0136. Aridoculture Center INRA-Settat, Morocco.
- Rodriguez J. et al. (2004) Wheat yield estimation using remote sensing and the STICS model in the semi-arid valley of Yaqui, Mexico. *Agronomie*, 24: 295–304.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme SudMed et au cours d'un post doc au Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), financé par le ministère délégué à l'enseignement supérieur et à la recherche français. Les auteurs tiennent à remercier tous ceux ce qui ont contribué à la réalisation de cette étude.

OÙ EN EST JAVASTICS ?

WHAT'S NEW ABOUT JAVASTICS?

D. Ripoche*, P. Bernard, M. Noe

INRA, Agroclim, Domaine St Paul site Agroparc , F-84914 Avignon cedex 9

*domi@avignon.inra.fr

Introduction

Le groupe Stics a décidé en 2004 de se lancer dans la mise au point d'une nouvelle interface utilisateur (IHM), le but étant de pouvoir fournir aux utilisateurs du modèle une interface multiplateforme et par là même de se défaire de la liaison exclusive à Windows en gardant les fonctionnalités de l'ancienne IHM et en permettant le déploiement de l'IHM sur les Systèmes d'Exploitation Linux ou Unix.

Ce travail est en passe d'aboutir : une nouvelle version devrait être fournie aux utilisateurs d'ici l'été 2007 avec les procédures nécessaires au transfert des fichiers et données entre les versions précédentes et celle-ci. Nous explicitons ici les choix essentiels sur lesquels sont basés l'IHM, les nouveautés et la mise en place de la nouvelle version.

Matériels et méthodes

Les choix faits

Le langage

Compte tenu de la contrainte de portabilité sur d'autres systèmes d'exploitation que Windows, nous avons opté pour le langage de programmation Java, celui-ci étant un langage fréquemment utilisé dans ce type de développement et assurant une portabilité certaine.

Les fonctionnalités

Nous avons également fait le choix de ne pas trop perturber l'utilisateur dans ses habitudes d'utilisation de l'interface et de laisser les mêmes menus et sous-menus que dans l'interface précédente. Certaines fonctionnalités ont été améliorées d'un point de vue ergonomique et fonctionnel :

- affichage graphique des sorties,
- saisie des données observées,
- mise au format et aux bonnes unités des fichiers climatiques.

Certaines fonctionnalités ont été rajoutées :

- historique des actions
- transformation des anciens fichiers paramètres au format XML

Les nouveautés

Les fichiers XML

La grande nouveauté de cette IHM est la modification du format des fichiers paramètres, jusqu'à présent en texte, en format XML. Ce changement a été décidé dans le cadre du projet innovant du département E&A intitulé " Étude d'une technique informatique d'interfaçage de modèles à vocation agro-environnementale "

Les avantages d'XML, langage à balise sont nombreux : langage ouvert et libre de droits, lisible au format ASCII, normalisé, compréhensible (car auto documenté) et intégrant ses propres données, réutilisable et évolutif. Il permet de faire de la représentation de données (méta données), de la validation de ces données et du partage de données. Les avantages de ce nouveau format restent pour l'instant, circonscrits à l'IHM puisque le fortran 77 ne lit pas en natif les fichiers XML et que la liaison entre l'IHM et le modèle se fait toujours par l'intermédiaire de fichiers texte.

Le réagencement de certains fichiers

Pour plus de cohérence nous avons fait le choix de réorganiser certains fichiers paramètres :

- Les fichiers climatiques en 2 parties :
 - Un fichier contenant les caractéristiques du poste, paramètres climat du fichier param.par et ligne d'entête de l'ancien fichier climatique
 - Un fichier contenant les variables météorologiques journalières
- Le fichier des USM :
 - Conservation du fichier USM définissant la configuration de la simulation par le choix approprié de fichiers d'entrée
 - Un fichier d'initialisation contenant les états initiaux du sol et des plantes (fichier ficini)

Les exécutable du modèle

La nouvelle interface s'accompagnera de quelques modifications au niveau du modèle :

- un seul exécutable gérant les cultures pures et les cultures associées
- un seul fichier des USMS : une USM de cultures associées pourra donc devenir en un seul click une USM de culture pure

Le déploiement

Celui-ci se fera à priori en 2 temps :

- Téléchargement de la nouvelle version à partir du site web de STICS
- Lancement d'un utilitaire de " mise au format " des répertoires existants.

La possibilité de transformer un ancien fichier paramètre, au choix, au format XML sera donnée dans les menus de l'IHM

Conclusion

Cette interface devrait être une passerelle vers le STICS nouvelle génération, intégrant les évolutions vers une vraie modularisation du modèle. La version devrait être disponible sur le site Web courant été 2007.

Références

- Moitrier N., Ripoche D., Fabre J.C., Charron-Moirez M.H., Moitrier N., Lecharpentier P. (2007) Étude d'une technique informatique d'interfaçage de modèles à vocation agro-environnementale. *Rapport du projet innovant DPT E&A*, 38 p.
- Noe M. (2006) l'IHM JavaStics. *Stage de fin d'étude IUP GMI-RTM-Master 2*.
- Farag M. (2005) Développement d'une interface utilisateur pour le modèle Stics. *Stage de fin d'étude IUP GMI-RTM-Master 2*.

AUTOMATISATION ET GENERATION DE COURBES DE REPONSE A L'AZOTE

AUTOMATIZATION AND GENERATION OF RESPONSE CURVES TO NITROGEN FERTILIZER

P. Zakharov*, E. Debove, N. Novello, E. Baranger
INRA, UMR Economie Publique, F-78850Thiverval-Grignon
[*pzakharov@grignon.inra.fr](mailto:pzakharov@grignon.inra.fr)

Introduction

L'idée générale consiste à produire des courbes de réponses à l'azote des principales grandes cultures européennes à partir des sorties de simulations STICS réalisées avec l'application ArTix.

Nous avons mis au point une méthode permettant :

- de transformer les points STICS en une courbe de réponse des rendements à l'azote,
- de sélectionner les entrées STICS (sol, date de semis etc.) en cohérence avec les informations économiques.

Au-delà de l'intérêt général, la production de ces courbes sert pour des études de changements climatiques (thèse en cours d'Elodie Debove, Baranger 2005) et constitue une étape indispensable au couplage entre STICS et le modèle économique AROPAj (De Cara et Jayet, 2000). Les résultats associés à ces courbes peuvent être utilisés également dans d'autres modèles ou études nécessitant ce type d'information.

Une première méthode a été mise en œuvre dans le cadre de la thèse de Caroline Godard (2005). Nous la présentons, ainsi que les améliorations qui y ont été apportées.

Méthodes

La méthode de base

L'étape préliminaire consiste à générer les "nuages" de points (couples "rendement – quantité d'azote apporté") de chaque culture pour chaque groupe-type¹. Cela est fait via l'application ArTix, c'est-à-dire suite à un enchaînement organisé de simulations STICS (version 5.0 modifiée, Brisson et al., 2002) (cf. poster ArTix).

La production des courbes peut être divisée en deux parties: la partie "ajustement de courbes" et la partie "sélection".

La partie "ajustement" des courbes consiste à faire correspondre une courbe de type exponentiel au "nuage" de points issu de STICS.

La forme de courbe retenue est:

$$R(N) = B - (B-A)e^{-\tau N},$$

avec R: la fonction de rendement;

N: la dose d'azote;

A, B et τ : les paramètres de courbe à définir.

La partie "sélection" consiste à sélectionner parmi les courbes d'un groupe-type (obtenues à partir de combinaisons différentes de sols, précédents, variétés, dates de semis, irrigation) la courbe (le cas permettant de s'approcher au mieux de l'optimum économique (un rendement et pour ce rendement une tangente égale au rapport de prix de l'engrais sur le prix de la culture).

La méthode de base, construite par Caroline Godard, s'articule de la manière suivante :

- 1) L'extraction des résultats de la base de données Artix (les données de simulation STICS);
- 2) La procédure d'ajustement des courbes par régression non-linéaire à l'aide du logiciel SAS;
- 3) La procédure de sélection des courbes.

La procédure de sélection consiste à choisir la courbe nous permettant d'approcher au mieux

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.

l'optimum économique. La théorie économique nous indique en effet que l'exploitant agricole va choisir la quantité d'engrais telle qu'en ce point, la tangente à la courbe de rendement sera proche au rapport du prix de l'engrais sur le prix de la culture.

Pour sélectionner une courbe, on utilise donc d'abord la valeur de rendement de référence (R0) issue des données économiques sur lesquelles s'appuie le modèle AROPAj. Les courbes n'atteignant pas ce rendement de référence sont éliminées. Pour chaque courbe atteignant R0, on calcule la valeur N0 de l'abscisse correspondant à l'ordonnée R=R0. Ensuite, on calcule la dérivée pour chaque courbe en ce point N0. Pour chaque cas traité (culture, groupe-type), la courbe sélectionnée est celle minimisant l'écart (en valeur absolue) entre la dérivée de la courbe en N0 et le rapport du prix de l'engrais sur le prix de la culture.

Les problèmes

Sans remettre en cause la validité de cette méthode, certains points faibles ont été mis en avant :

1) Le modèle STICS est utilisé en dehors de sa zone de calibrage, en particulier pour des doses d'azote très élevées (supérieures à 400 kg.ha⁻¹). Pour ces doses, il arrive parfois que le rendement simulé par STICS continue d'augmenter au lieu d'atteindre un plateau. Une des conséquences directes est que la procédure d'ajustement des courbes aboutit presque à une droite sur la plage d'azote considérée.

2) Pendant la phase d'ajustement des courbes, la valeur B ($B = \lim_{N \rightarrow \infty} R(N)$) n'est pas limitée. On a ainsi constaté que cela pouvait donner lieu à de "mauvais" résultats d'ajustement.

3) Lors de l'étape de "sélection" nous sélectionnons parfois des courbes pour lesquelles N0 (dose correspondant au rendement optimal) est supérieur à 400 kgN.ha⁻¹ ce qui ne correspond pas à une réalité agronomique.

La graphique suivant illustre ces types de problèmes :

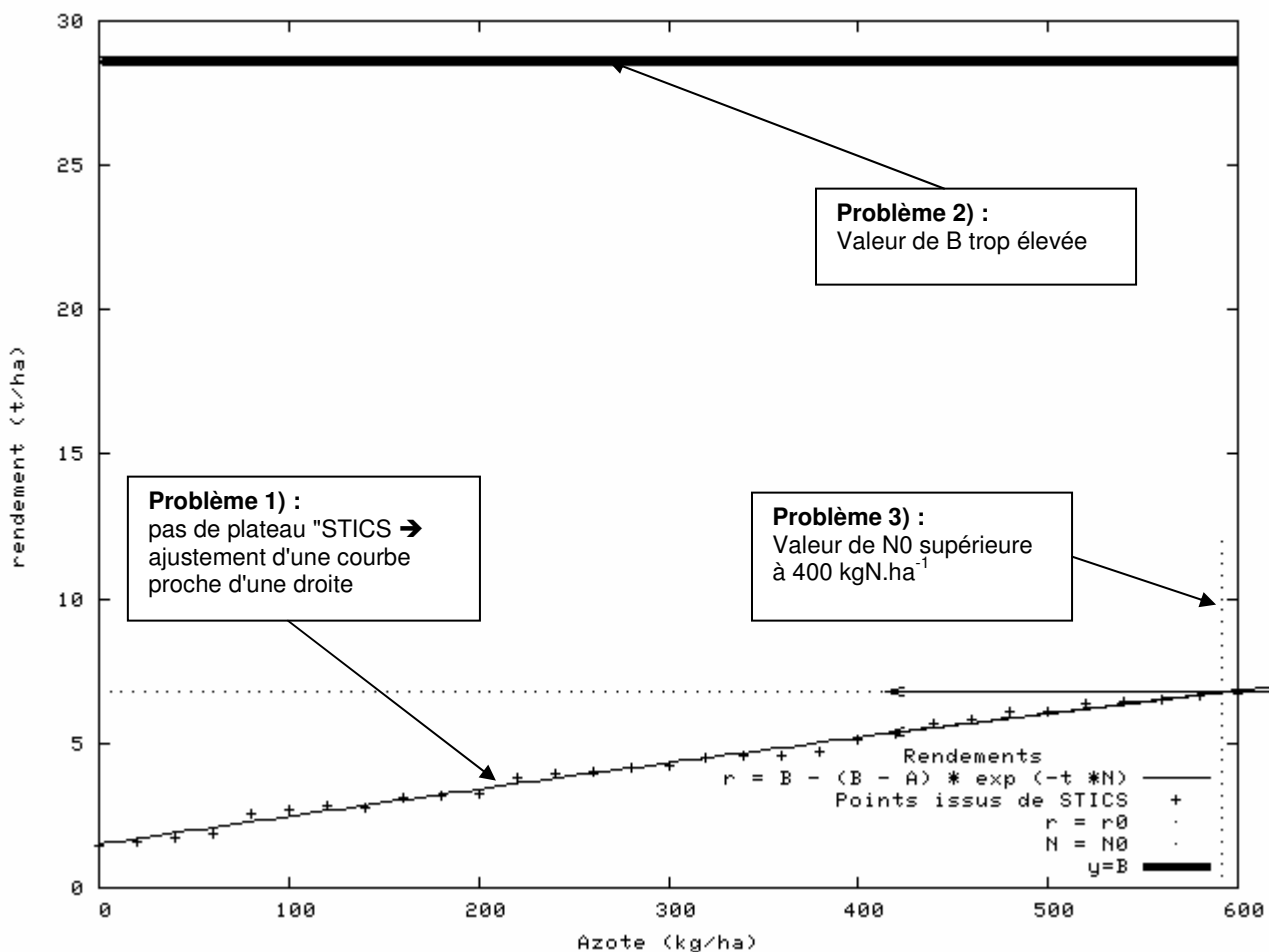


Figure 1 : courbe de réponse à l'azote et ajustement pour la culture de blé tendre d'hiver de la région Rhône-Alpes, du groupe-type 38 (année climatique 2001-2002)

Les améliorations proposées

Par rapport aux problèmes énoncés dans la partie précédente, certaines améliorations ont été envisagées.

1) Lors de l'étape de l'extraction des données de la base Artix nous cherchons à baisser les points au-delà de 400 kgN.ha⁻¹. Ainsi les rendements correspondant à des doses d'azote supérieures à 400 kg.ha⁻¹ sont limités par le rendement au point N=400 (R [400]) augmentés d'une certaine valeur dépendante de l'éloignement (la contrainte imposée à l'extraction pour N>400 sera de la forme : $R(N) \leq (R(400) + 0.001*((N-400)/20))$).

2) Dans la procédure de régression non-linéaire nous cherchons à ajouter une limite sur la valeur de B au-delà du rendement maximal atteint par la courbe.

3) Nous supprimons de l'étape de sélection toutes les courbes dont la valeur N0 est supérieur à 400 kgN.ha⁻¹. La sélection se fait ainsi parmi les "bonnes" courbes.

Résultats

Le tableau 1 compare les résultats obtenus à partir de deux méthodes de sélection: la méthode initiale et cette même méthode améliorée selon les points 1 et 3 ci-dessus. Ces résultats concernent les courbes de réponse à l'azote des groupes-types du modèle AROPAj pour la France et pour les cultures : blé tendre, blé dur, colza, orge, tournesol, pomme de terre, maïs. 800 cas ont été traités (groupe x culture), sur ces 800 cas, 200 environ n'aboutissent à aucun résultat : la raison principale est qu'il n'y a pas d'intersection entre la droite R=R0 et les courbes issues de STICS.

	La méthode de base	La méthode de base plus améliorations 1 et 3
Pas de courbes sélectionnées	192	203
Le nombre de courbes avec la valeur B trop grande	15	2
Les courbes avec N0 > 400	31	0

Tableau 1 : comparaison des méthodes

L'intérêt de la nouvelle méthode réside dans l'usage qui est fait des courbes dans le modèle économique AROPAj. La limitation sur la quantité d'azote garantit des niveaux de charges en engrais acceptables pour des rendements agronomiques atteignables.

Conclusion

En faisant des simulations prenant en compte différentes combinaisons de ces améliorations nous pouvons constater que le nombre de courbes pour lesquelles nous avons eu de "mauvais" résultats avec la méthode de base et qui ont été améliorées avec ces changements n'est pas très grand. Environ 30-40 courbes sur 800 cas que nous avons traité.

En revanche, nous avons bien vu que ces nouvelles méthodes offrent beaucoup plus de "garantie".

En prenant tous ces facteurs en compte nous avons donc finalement retenu la combinaison de la méthode de base avec les améliorations 1 et 3.

Cela permet d'une part d'ajouter le minimum de contraintes dans la procédure de sélection des courbes et d'autre part d'éliminer tous les cas où le N0 était supérieur à 400 kgN.ha⁻¹. Elle limite aussi la valeur de B (rendement maximal) à des valeurs presque toujours réalistes (3 cas sont légèrement problématiques sur 800). D'autre part, le nombre de cas où il n'y a pas de sélection de courbes est comparable à la méthode initiale mise en place par la thèse de Caroline Godard.

C'est cette nouvelle méthode de sélection qui est utilisée pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'offre agricole française (cf. poster Debove et al.).

Références

- 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.
- Brisson N., Mary B. (2002) STICS versions 5.0 Notice concepts et formalismes, INRA
- De Cara S. et Jayet P.A. (2000) Emissions of greenhouse gases from agriculture : the heterogeneity of abatement costs in France, *European Review of Agricultural Economics*, 75 (4): 597–623.
- 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. de Roger-Estrade, J.) Thèse de doctorat en Agronomie (Ecole doctorale ABIES, Ademe, Inra, INA-PG). Grignon : INRA UMR Economie Publique, 2005, - 278 p. ill, bib, cartes, tab.

THEME 3

EVALUATION DE STICS EN SIMULATION CONTINUE PENDANT 8 ANS SUR UN RESEAU DE PARCELLES AGRICOLES

STICS EVALUATION FOR CONTINUOUS 8 YEAR TIME COURSE SIMULATION AGAINST AN 'ON FARM' SOIL-CROP DATABASE

Beaudoin N.^{1*}, Launay M.², Ponsardin G.³, Sauboua E.⁴, Mary B.¹

¹ INRA, UR1158 Unité d'Agronomie Laon-Reims-Mons, Rue Fernand Christ, F-02007 Laon

² INRA Agroclim Avignon, ³Chambre d'Agriculture 51, ⁴ INRA EGC Grignon.

*beaudoin@laon.inra.fr

Introduction

Les eaux superficielles et souterraines doivent recouvrir un bon état chimique et biologique en 2015 (Directive Cadre européenne sur l'Eau, 2000). Ce défi implique d'être capable de faire un diagnostic de l'impact des systèmes de culture sur la qualité de l'eau, à de larges échelles de temps et d'espace. Il peut être réalisé, de façon quantitative, à l'aide de modèles de culture à conditions qu'ils soient correctement évalués à court et long terme et en situation agricole réelle. Notre but est de vérifier la robustesse du modèle de récolte STICS (Brisson et d'autres *et al.*, 2002) pour prédire l'absorption d'azote et la lixiviation du nitrate dans des situations pédologiques variées pendant 8 ans consécutifs (Beaudoin *et al.*, accepté).

Matériel & méthodes

Plusieurs bases de données expérimentales ont été compilées pour calibrer de façon indépendante, les paramètres pédologiques, techniques et spécifiques du modèle STICS 6 (Beaudoin *et al.*, 2005a). STICS a été ensuite évalué sur une base de données, en situation 'on farm', du bassin hydrologique de Bruyères au Nord-Est de la France. Cette base comprend les données, sans répétition, des stocks d'eau et d'azote minéral du sol, de la production de biomasse et de la quantité d'azote absorbé sur 36 stations localisées dans 21 parcelles, suivies pendant 8 ans (Beaudoin *et al.*, 2005b). Les incertitudes sur les données élémentaires ont été estimées à 10-37mm sur les stocks d'eau du sol (SES), à 15-25% sur les mesures de stocks d'azote minéral (AMS) du sol et à 10% sur la biomasse, au risque 0.10.

STICS a été évalué, soit en le réinitialisant à chaque cycle cultural (RS), soit après des simulations continues pendant 8 ans (CS). Le test du modèle est fait par comparaison entre valeurs observées et simulées et par étude de sensibilité à la variation de certains des paramètres les plus influents, conformément à Loague & Green, 1991. Le critère statistique utilisé ici est l'efficience :

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Où (O_i) est l'observation et (S_i) la simulation. Son calcul permet de comparer les performances de différents paramétrages d'un modèle ou modèles appliqués au même jeu de données.

Résultats

Les cinétiques des stocks d'eau du sol, d'azote de minéral de sol et de production de biomasse à la récolte sont présentées en Figure 1 pour deux sols contrastés : un sol limono-sableux peu profond sur calcaire grossier (a) et un sol limoneux épais (b). Les variations du stock d'eau du sol sont bien reproduites à la fois par les simulations réinitialisées et continues. Les valeurs observées en hiver ont été légèrement sous-estimées, particulièrement en 1995-1996, peut être à cause d'une longue période de gel. Les stocks d'AMS sont bien simulés en moyenne ; le sol limoneux épais présente des accumulations temporaires que CS ne prend pas bien en compte. Le sol calcaire perd la majeure partie de l'AMS chaque hiver, phénomène qui est bien simulé. La biomasse à la récolte est mesurée sur placettes hors passage de roue. Le modèle sous estime parfois au-delà de l'incertitude de mesure; mais il simule bien, en moyenne, le potentiel de production de ces deux stations. Nous avons ensuite comparé les 220 couples (observation, simulation) de l'ensemble des stations (non présenté). La dispersion des points était importante. Nous avons donc groupé les situations ayant des types de sol semblables et la même culture, ce qui donne un nombre total de 55 groupes d'observations. Cette procédure a augmenté EF de 0.0 à 0.2 suivant les variables quand EF > 0.

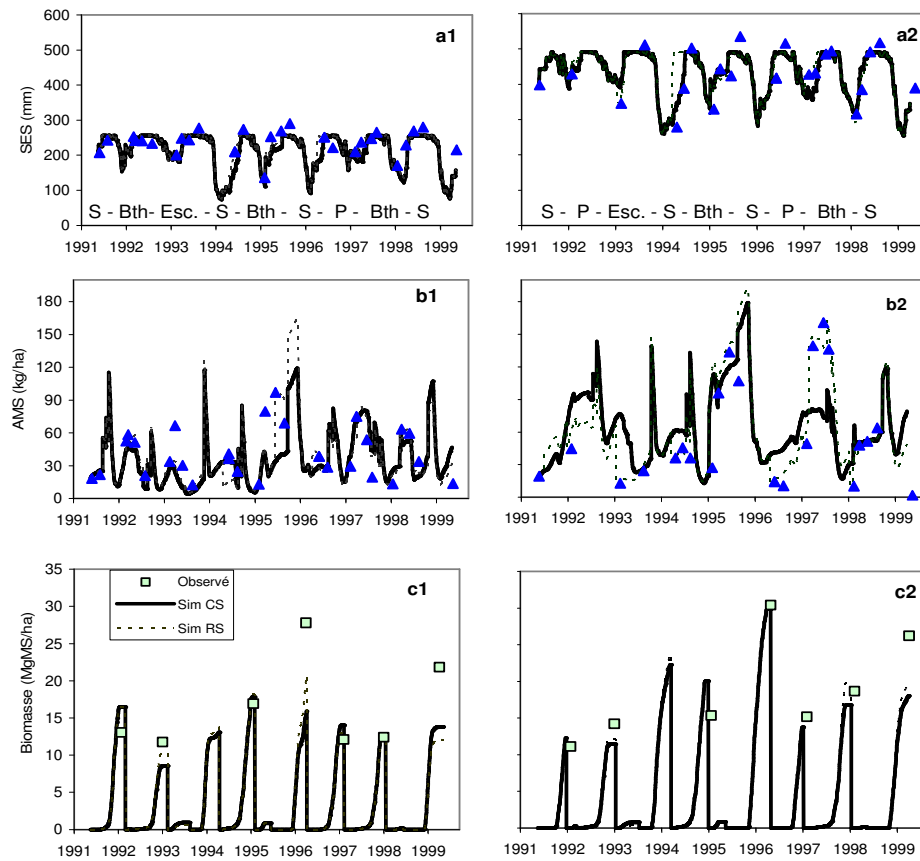


Figure 1 : Cinétiques observées et simulées, avec réinitialisation (RS) ou continues (CS), du stock d'eau (a), du stock d'azote nitrique (b) et de production de biomasse (c), sur deux sols d'une même parcelle du plateau de Bruyères (02), 1= sol limono-sableux développé sur calcaire grossier ; 2= sols limoneux épais.

	Efficience (EF)		Valeurs prédites	
	RS	CS	RS	CS
stock d'eau du sol (SES) 1 ^{er} déc (mm)	0.93	0.94	326	327
stock d'azote nitrique du sol (AMS) 1 ^{er} déc. (kg N ha ⁻¹)	0.61	0.38	45	43
Rendement (Mg ha ⁻¹ a ⁻¹)	0.62	0.59	7.8	7.5
Quantité de résidus (Mg ha ⁻¹ a ⁻¹)	-0.31	-0.37	6.7	6.4
Absorption N (kg N ha ⁻¹ a ⁻¹)	0.69	0.60	179	171
Minéralisation des résidus (kg N ha ⁻¹ a ⁻¹)			-7	-20
Drainage (mm a ⁻¹)			200	192
Lixiviation (kg N ha ⁻¹ a ⁻¹)			21	20
Dénitrification+ volatilisation (kg N ha ⁻¹ a ⁻¹)			26	26

Tableau 1 : Efficience de prédiction par STICS et valeur moyenne de variables d'état et d'intérêt pour les 36 stations du site de Bruyères, avec ré-initialisation (RS) ou continues (CS) pendant 8 ans.

Le graphique 2 donne les comparaisons entre observations et simulations, après regroupement, pour ces différentes variables. La figure équivalente pour RS, qui n'est pas présentée, donne des nuages de points légèrement plus resserrés : à l'exception du stock d'eau, l'efficience est toujours supérieure avec RS par rapport à CS (tableau 1).

Les stocks d'eau sont bien simulés mais un léger biais apparaît à la récolte. Les prédictions d'AMS au 1^{er} décembre et au 10 février sont satisfaisantes tandis que celle à la moisson ne l'est pas. Les prédictions de la biomasse, du rendement et de l'azote absorbées sont correctes en moyenne mais présentent des biais pour certaines cultures prises isolément (betterave, pois, colza). La prédiction de la quantité d'azote des résidus est mauvaise. Elle est due soit à celle de l'indice de récolte, soit à celle de l'azote absorbé (colza), soit à celle de l'indice de récolte N (pois, céréales). La bonne prédiction du stock d'azote des résidus de la betterave semble due à une compensation d'erreur.

Les procédures RS et CS diffèrent principalement dans la prédiction de la minéralisation des résidus, avec -7 et -20 ha⁻¹a⁻¹, respectivement (Tableau 1). Les flux d'eau et d'azote correspondent à des concentrations nitriques moyennes de l'eau percolée de 38 et 39 mg NO₃ l⁻¹ respectivement. Cependant, en prenant un type de sol donné, les différences de prédiction entre les deux procédures s'accroissent. Les pertes par voie gazeuse, simulées par RS ou CS, dépassent celles de la lixiviation.

Les paramètres auxquels la lixiviation moyenne est la plus sensible sont *Mh* et *obstarac*, surtout à long terme. Le paramètre *osbtarac* est ici changé uniquement pour les sols superficiels, car l'information manque pour simuler +20% de sa valeur en sols profonds. Par contre, sa réduction de 20% sur tous les sols change la lixiviation moyenne de +28% (non présenté). La lixiviation est légèrement sensible l'estimation de l'efficacité de l'azote, à long terme. Les paramètres étant estimés d'une façon identique pour RS et CS, la sensibilité du modèle à la qualité de prédiction des paramètres varie en fonction du temps de simulation.

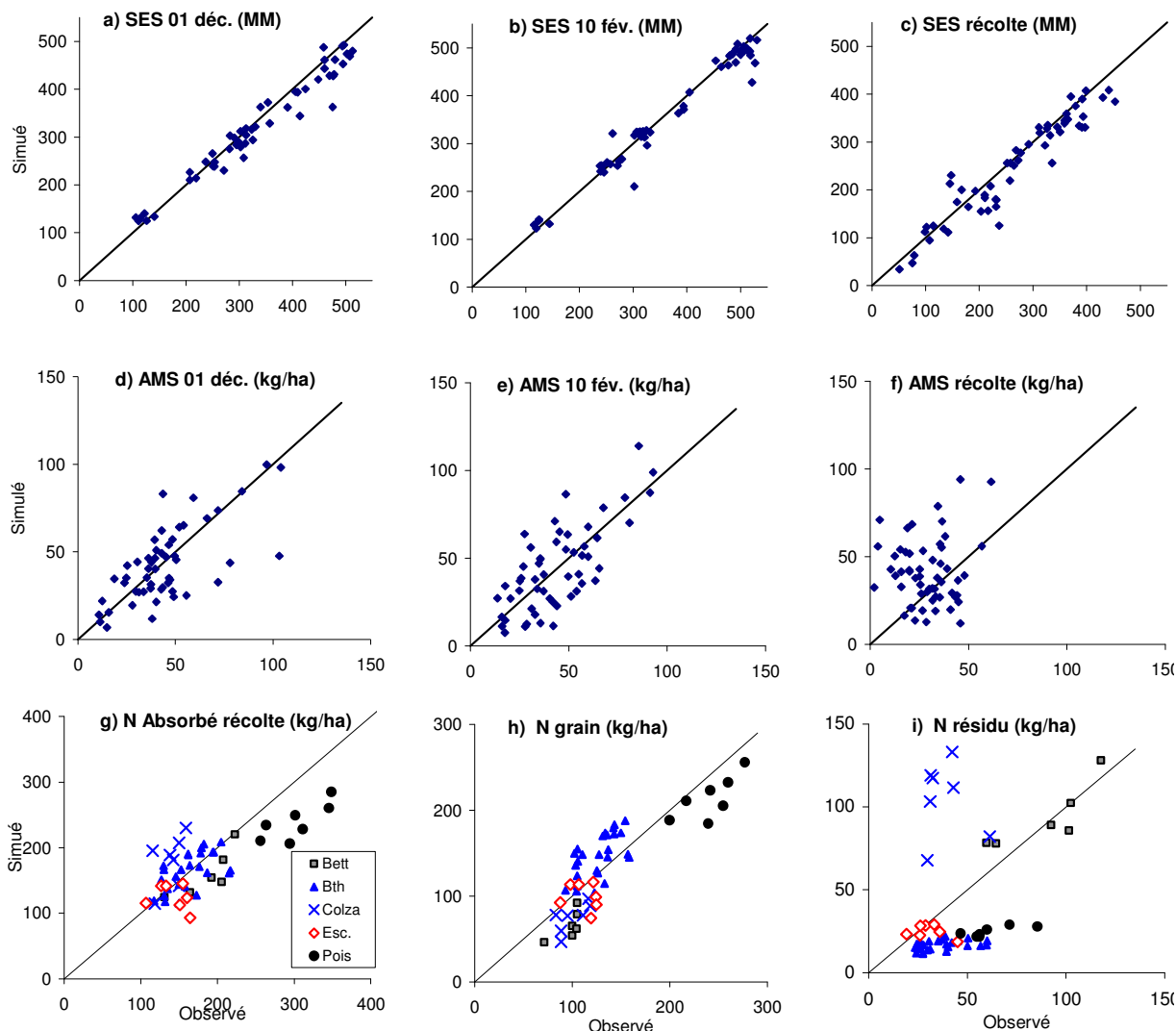


Figure 2: Comparaison des observations et simulations des stocks d'eau (SES) et stocks d'azote minéral (AMS) à 3 dates et des quantités d'azote des cultures à la récolte (plante entière, rendement, résidu), par simulations continues pendant 8 ans, en regroupant les situations par 4.

	RS						CS					
	Obstarac-SS		efficience	Mh	profres		Obstarac_SS		efficience	Mh	profres	
	-20%	+20%	+20%	+20%	min	max	-20%	+20%	+20%	+20%	min	max
Absorption	-3	2	7	6	-0	0	-2	1	7	6	-1	1
Lixiviation	2	-1	0	6	2	0	14	-6	4	18	-0	7
Immobilisation	-3	0	-17	0.	0	0	-3	0	-17	0	0	0
Dénitrification	-3	-0	-34	-1	-0	0	-3	0	-34	-1	-0	-0
Volatilization												

Tableau 1 : Sensibilité des prédictions moyennes de STICS pour les 36 stations du site de Bruyères, avec ré-initialisation (RS) ou continues (CS), aux variations d'obstarac des seuls sols superficiels (SS), de l'efficacité de l'engrais azoté, de Mh (Minéralisation de l'humus) et profres (profondeur à partir de laquelle les résidus sont incorporés). L'efficacité est déterminée de façon globale après modification Vabs2 et Xorgmax. Profres min = proftrav-1cm ; Profres min = 0.

Discussion et conclusion

La calibration des paramètres, q_0 , $profres$ et $qmulch$ avait permis d'améliorer les prédictions de SES et AMS en sol nu, à court terme (Beaudoin *et al.*, 2005a). Mais l'impact de ces modifications sur les sorties à l'échelle de la rotation semble faible. La prise en compte du paillis après récolte, en sol nu, a permis d'augmenter le drainage moyen de 10 mm dans CS. Cette augmentation serait plus forte en cas de non labour. La prédiction de la lixiviation moyenne est peu sensible aux variations de $profres$. Ce ne serait pas le cas sur l'organisation à long terme ou encore moins sur les pertes par voie gazeuse (Oortz, 2003).

L'exigence de prédire sans biais le niveau de restitution de matière organique des cultures a été montré par Gabrielle *et al.*, 2002. Les paramètres des fichiers plantes ont été calibrés sur des données indépendantes, module par module, en commençant par les développement phénologique, racinaire et foliaire, puis de croissance (Beaudoin *et al.*, 2005a). Certains compromis ont du être alors acceptés entre l'objectif de bien simuler la quantité d'azote absorbé et celui de bien reproduire l'AMS. Les écarts de prédictions constatés sur certaines cultures sont dilués à l'échelle de la rotation car ils ne sont pas systématiques. Kersebaum and Beblík (2001) ont montré que la simulation de la lixiviation à long terme était peu dépendante des erreurs aléatoires de prédiction de la production de biomasse. Par contre, cela n'est pas vérifié par Blombäck *et al.* (2003) qui obtiennent un biais de + 25% sur la prédiction de la lixiviation avec RS ou CS au bout de 8 ans, peut être à cause d'un défaut d'estimation de l'absorption des repousses.

Les prédictions du drainage et de la lixiviation, par RS, sont très proches des résultats obtenus à partir des données et du modèle LIXIM, à même profondeur de sol (Beaudoin *et al.*, 2005). La faible différence entre les sorties de RS et CS indique qu'il n'existe pas de dérive du modèle sur le long terme. Cela valide les modules de minéralisation et d'absorption de STICS. Le module commun de transfert de STICS et LIXIM a été déjà validé sur des données de stocks d'eau (Beaudoin *et al.* 2005b ; Mary *et al.*, 1999) ou de drainage sous lysimètres (Schnebelen *et al.*, 2004, Sauboua, 2001). La robustesse du module de minéralisation de l'humus a aussi été validée sur des données de stocks ou de flux d'azote (Gabrielle *et al.*, 2002 ; Beaudoin, 2006); mais sa précision peut être accrue (Valé, 2005).

L'intérêt de grouper les données de situation confirme les résultats de Kersebaum and Beblík (2001). La nécessité de ce regroupement signifie que le modèle ne peut être testé à la fois en tout lieu et à tout moment. A long terme et sur de large espace, la prédiction de la lixiviation sera très dépendante des estimations de la vitesse de minéralisation de l'humus et de la profondeur d'enracinement. Ces paramètres ont fait l'objet de mesures dédiées dans notre étude. Ils demanderaient d'être bien renseignés, dans un diagnostic à l'échelle régionale. Le modèle est aussi sensible à long terme, à la prédiction de la part d'azote perdue par voie gazeuse, qui n'a pu être validée dans notre étude. Ce qui requiert des travaux complémentaires (cf le projet de thèse de J. Constantin, INRA de Laon). En satisfaisant ces exigences, le modèle peut devenir un outil de gestion durable de l'azote à l'échelle du territoire.

Références

- Beaudoin N. et al, (2005a) Test de STICS 6 pour sa généralisation à l'ensemble des cultures des rotations d'un bassin hydrologique. Séminaire des 17-18/03/05. Carry le Rouet.
- Beaudoin N et al., (2005b). Nitrate leaching in intensive arable agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 111: 292-310.
- Beaudoin N (2006). Caractérisation expérimentale et modélisation des effets des pratiques culturales sur la pollution nitrique d'un aquifère en zone de grande culture. Ph.D. thesis, INA-PG, Paris.
- Blombäck K., Eckersten H., Lewan E., Aronsson H. (2003) Simulations of soil carbon and nitrogen dynamics during seven years in a catch crop experiment. *Agricultural Systems* 76: 95-114.
- Brisson N *et al.*, (2002) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II- Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22: 69-92.
- Gabrielle B et al. (2002) Simulation of carbon and nitrogen dynamics in arable soils: a comparison of approaches. *European Journal of Agronomy* 18: 107-120.
- Kersebaum K.C., Beblík A.J. (2001). Performance of N dynamics model applied to evaluate agricultural management practices. In: Modelling C. & N. dynamics for soil management. Shaffer et al. Eds, Lewis Publishers, 550-569.
- Loague K., Corwin D.L. (1996) Uncertainty in regional-scale assessments of non-point source pollutants. In: Application of GIS to the modelling of non-point source pollutants in the vadose zone, S.S.S.A. Special publication 48.
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M. (1999). Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science* 50: 549-566.
- Oorts K. (2006) Effect of tillage systems on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam in Northern France, *thesis* of Leuven University and INA Paris, 157 p + appendix.
- Sauboua E. (2001). Modélisation stochastique fonctionnelle du transfert d'eau et d'azote sous culture de maïs.. Ph.D. thesis, LTHE, Université de Grenoble, 199p.
- Schnebelen N., Nicoulaud B., Bourennane H., Couturier A., Verbeque B., Revalier C., Bruand A., Ledoux E. (2004) The STICS model to predict nitrate leaching following agricultural practices. *Agronomie* 24, 423-435.
- Valé M. (2006) Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote *in situ* de l'azote du sol, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. Thèse de doctorat de l'ENSAT. 182p+annexe.

PRISE EN COMPTE DE LA PÉRENNITÉ DES HERBACÉES DANS STICS

TAKING INTO ACCOUNT THE PERENNITY OF GRASSES

Françoise Ruget¹, Nadine Brisson²

CSE(1) et Agroclim(2), Bâtiment climat, INRA, Site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9

¹francoise.ruget@avignon.inra.fr

Introduction

Dans STICS, les principaux paramètres « plante » réestimés spécifiquement pour la prairie, ou qui pourraient l'être pour distinguer des espèces, concernent la mise en place d'indice foliaire (durées des phases, seuils de températures et vitesse de mise en place) ; l'efficacité de conversion du rayonnement (efficacité maximale, seuils de température), la sénescence (somme de température de début et vitesse de sénescence) ; les besoins en azote (LEMAIRE et GASTAL, 1997). Le fichier plante, nommé prairie, et diffusé avec la version standard de STICS, est celui utilisé dans l'application ISOP, il caractérise une prairie standard moyenne qui peut émettre des feuilles toute l'année (pas de blocage lié à la montée à graine). Ce paramétrage robuste, qui permet de maintenir le couvert vivant, même si aucune coupe n'a eu lieu, caractérise un fonctionnement multispécifique où une espèce peut prendre le relais d'une autre et où, au sein d'une espèce, les talles filles « végétatives » prennent le relais des talles qui sont montées et qui ont été décapitées par la fauche ou le pâturage. De ce fait, on n'atteint jamais le stade de fin d'émission de feuilles. Ce jeu de paramètres a été construit sur 91 situations réparties en France et sur plusieurs années, avec ou sans irrigation et fertilisation, à différentes saisons, et validé sur 177 situations (RUGET *et al.*, 2006).

Intérêts et insuffisances de STICS-ISOP

La production annuelle

Le système ISOP (RUGET *et al.*, 2001 ; RUGET *et al.*, 2006) estime la variabilité interannuelle de production pour chaque région fourragère et l'évolution au cours de l'année de cette production, en valeur relative par rapport à la production « normale » de la même zone à la même date. Le modèle est alimenté par une base de données climat - sol - techniques construite spécifiquement (collaboration SCEES, INRA CSE et Infosol, Météo-France).

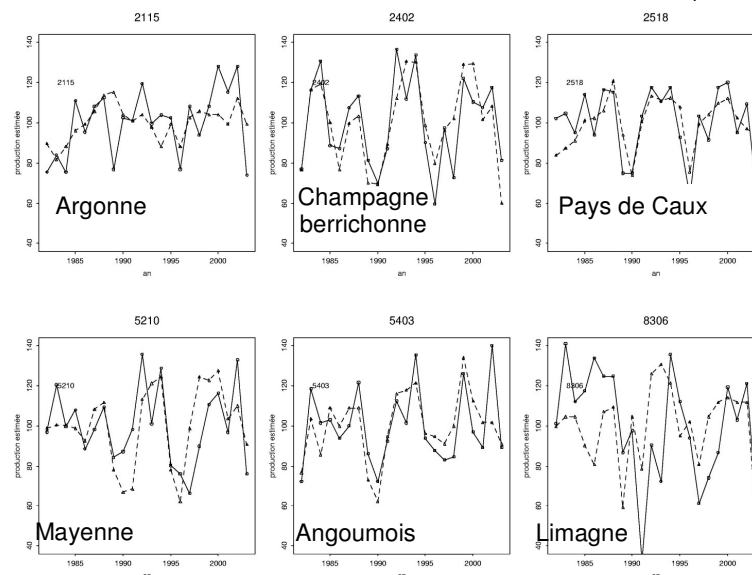


Figure 1 : Exemples de variabilité interannuelle relative régionale, de 1982 à 2003, pour quelques régions fourragères.

En moyenne nationale sur 20 ans (de 1984 à 2003), selon les statistiques du SCEES, le rendement des prairies françaises est de 5 t/ha de MS avec des valeurs variant entre années de 3,6 à 6,1 t/ha (chiffres SAA, SCEES), ce qui correspond à un rapport amplitude/moyenne de 0,5. Les estimations ISOP donnent des valeurs absolues un peu plus élevées (moyenne nationale 6,7 ; minimum interannuel 3,8 ; maximum 9,2 t/ha), ce qui correspond, à cause des maxima plus

élevés, à une variabilité plus forte (amplitude/moyenne de 0,8).

A l'échelle régionale (Figure 1), en valeur rapportée à la moyenne régionale, les estimations du modèle sont généralement proches des estimations des experts. Elles donnent de très grandes amplitudes de productions régionales : l'amplitude interannuelle de production se situe majoritairement entre 50 et 100% de la moyenne, avec quelques rares valeurs plus faibles, par exemple dans les montagnes régulièrement arrosées, et quelques valeurs plus élevées dans des zones sèches, souvent peu productives, essentiellement à cause des années très sèches 1989, 1990, 1996 et 2003.

Les intensités de sécheresse, très différentes selon les régions, sont bien montrées par ISOP. Les zones touchées par la sécheresse sont différentes selon les années : celle de 1996 a affecté principalement la moitié nord de la France, tandis que celle de 1989 a affecté toute la France, mais surtout le Sud-Ouest. Les années 1990 et 1991 ont respectivement affecté la moitié ouest et le quart nord-est de la France.

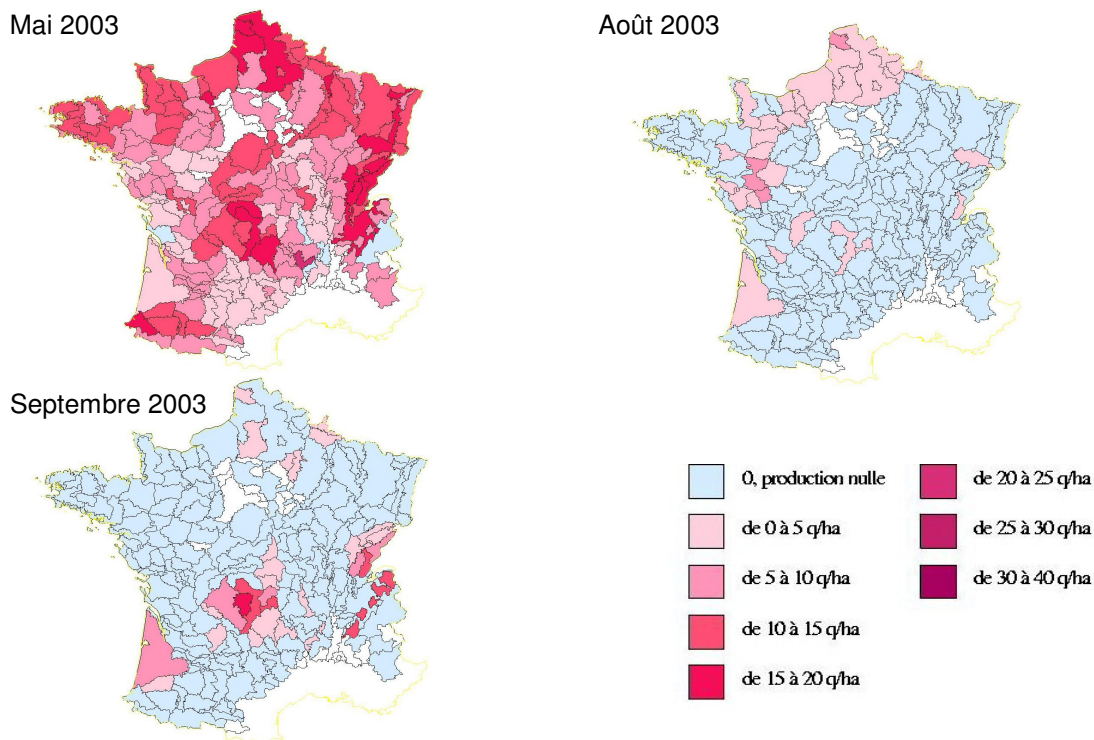


Figure 2 : Cartes de productions mensuelles des mois de mai, août et septembre 2003.

Insuffisances de STICS-ISOP : variabilité au cours de l'année ou entre régions

Les grandes tendances sont simulées correctement par ISOP à l'échelle régionale ; l'entrée en sécheresse est fiable, en particulier en 2003 et en 2005. En effet, en 2003 par exemple (Figure 2), les cartes de productions mensuelles nationales font apparaître des valeurs très faibles dès le mois de mai sur une grande partie de la France ainsi que l'arrêt quasi général de croissance en août, ce qui correspond bien aux observations locales. Cependant, la reprise très faible en septembre est contraire aux observations.

Ainsi, la période estivale non productive et la reprise ne sont pas simulées de façon précise par STICS-ISOP. En période sèche, la gestion simple de l'indice foliaire (absence de sénescence, calendrier de développement) et le manque de précision sur certains paramètres peuvent conduire :

- si aucune coupe n'intervient, à des conditions de reprise très favorables dès le retour des pluies d'automne puisque le feuillage est déjà en place, ce qui est plausible pour des périodes de sécheresse courtes mais certainement pas pour des périodes longues

- au contraire, à une reprise simulée trop lente (exemple de 2003), qui peut provenir d'un manque de réactivité de la simulation au retour à des conditions meilleures (persistance de l'indice de stress azoté), ou bien d'une surconsommation de l'eau par évaporation directe du sol (qualité du paramétrage de l'évaporation de surface en sol nu), ou encore à l'absence de prise en compte des réserves carbonées et azotées qui assurent le caractère pérenne du couvert.

Bien représenter la pérennité des prairies : vers un modèle plus général au cours de l'année et en Europe

Ces trois dernières années, des avancées ont été incorporées dans le modèle STICS (Brisson *et al.*, 2006) ou sont en cours d'incorporation (projet CEAPC du programme national PNBC, projet européen PERMED).

Notions récemment introduites ou en préparation

- **durée de vie, expansion et sénescence foliaire** (d'après Duru *et al.*, 1995)

La notion de durée de vie, récemment introduite dans le modèle, pilote la sénescence foliaire, à travers plusieurs paramètres supplémentaires (partition de matière sèche entre feuilles et pseudotige, limites de surface spécifique). En conditions sèches, il sera nécessaire de tester si cette notion, plutôt que celle de mortalité des feuilles par autoombrage, est adaptée, c'est-à-dire si les paramètres permettent de maintenir un faible indice foliaire pendant une durée satisfaisante.

- **optimums et extrêmes thermiques** : Des extrêmes ont été ajoutés pour bloquer la croissance foliaire et le développement aux températures élevées
- **prise en compte des réserves**

Les réserves sont calculées dans STICS comme le complémentaire entre d'une part la biomasse accumulée et, d'autre part, la croissance structurale des feuilles et des tiges. Ceci nécessite un dimensionnement plus ou moins implicite de ces compartiments (proportion tige/feuilles (=pseudotige/limbe) en matière sèche structurale et surface spécifique maximale et minimale). Les réserves ne sont pas localisées et peuvent être remobilisées quand le potentiel de croissance ne peut être satisfait par les assimilats néoformés. On trouve des valeurs de stockage de l'ordre de 2 t/ha et la conservation de ces valeurs d'une année sur l'autre (Figure 4) est importante. Dans l'exemple présenté, la période estivale comme le démarrage printanier apparaissent comme des périodes consommatrices de réserves carbonées et azotées.

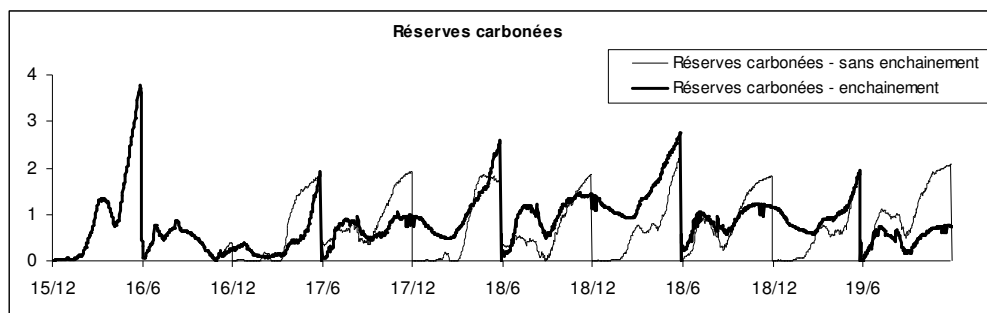


Figure 3 : Calcul de la dynamique des réserves d'une prairie de fétuque à Montpellier de 1994 à 2003 en faisant l'hypothèse (trait fin) que les réserves sont réinitialisées à chaque début d'année ou (trait gras) qu'elles ne sont pas réinitialisées.

- **croissance et turn-over racinaire (réservoir d'azote)**

Le choix possible entre deux options : un profil type qui dépend de l'espèce et sur lequel la densité de sol n'agit pas, et une croissance en longueur répartie dans le profil selon la densité du sol, qui permet aussi de prendre en compte une mortalité racinaire à la coupe, source de fragilité potentielle du couvert en cas de forte sécheresse mais également réservoir d'azote après minéralisation pour la reprise

- **indice azoté instantané**

L'indice de stress azoté instantané est, non plus un indicateur d'état, mais un indicateur de « flux », a été proposé dans la dernière version de STICS s'appuyant sur les travaux de DEVIENNE-BARRET *et al.* (2000). Il correspond au rapport entre absorption réelle et absorption « critique », permettant de couvrir les besoins métaboliques.

- **paramétrage pour un fonctionnement en talles indépendantes**

Plutôt qu'un fonctionnement en densité de plantes, nous avons choisi d'utiliser un peuplement en densité de talles, ce qui revient à considérer les talles comme indépendantes, et à pouvoir représenter une vraie densité de peuplement de tiges

- **mortalité des talles**

Lorsque la sécheresse se prolonge, les réserves peuvent ne pas être suffisantes pour permettre la survie de l'ensemble du peuplement de talles. On cherche donc à comparer les besoins potentiels de croissance et la disponibilité en réserves, pour simuler la consommation et

l'éventuel épuisement des réserves. Cela justifie que mise en réserves, besoins et rythme d'utilisation des réserves soient bien dimensionnés. Dans le cadre du projet européen PERMED, la mise au point et le test d'un formalisme permettant de provoquer la mortalité des talles est en cours de construction. Il est basé sur l'équilibre source/puits : l'épuisement des réserves pourrait empêcher le redémarrage d'une fraction du couvert, dépendant de l'intensité de la sécheresse.

Mise en œuvre de ces notions

Le couvert herbacé pérenne subit diverses contraintes (sécheresse et froid principalement), conduisant à des arrêts et reprises de végétation.

- **arrêts de végétation estival et hivernal**
arrêt estival : entrée en sécheresse

L'arrêt de végétation estival peut être la conséquence "simple" de la sécheresse, -et ce cas peut être traité dès maintenant, car l'absence d'eau induit un arrêt de la croissance,- ou le résultat d'une dormance (VOLAIRE et NORTON, 2006), et ce point ne sera pas intégré dans l'immédiat. Lorsqu'il est la conséquence de la sécheresse, l'arrêt de végétation provient de 2 effets concomitants : le ralentissement de la mise en place d'indice foliaire et le ralentissement de la conversion du rayonnement intercepté, tous deux fonctions du stress hydrique (respectivement le stress de turgescence et le stress stomatique).

arrêt d'automne

L'arrêt en fin d'année provient du ralentissement des mêmes phénomènes, mise en place foliaire et conversion du rayonnement intercepté, sous l'effet des températures basses, tandis que seule la croissance d'indice foliaire peut être limitée par la photopériode et les besoins en froid.

- **la reprise après arrêt**

pluies d'automne : vitesse de reprise, mortalité

Au retour des pluies d'automne, la reprise est assurée par l'utilisation de réserves qui permet d'assurer une croissance foliaire conforme à la possibilité offerte par la température et la levée du stress hydrique et azoté. L'indice de stress azoté instantané permet au couvert d'être plus réactif à la levée des stress, et en particulier du stress hydrique : il y doit donc y avoir accélération de la reprise en utilisant cet indice.

reprise de printemps : la température est-elle suffisante?

Jusqu'à présent, la reprise de printemps dépend principalement de l'effet de la température sur la mise en place d'indice foliaire. Depuis l'introduction de la gestion d'un compartiment de réserves, elle peut aussi être limitée par celles-ci.

Conclusion

Si l'introduction de ces formalismes ouvre de très larges possibilités supplémentaires en termes de situations qui peuvent être simulées, elle nécessite le calage de paramètres nouveaux, voire la réévaluation de paramètres dont la signification a été modifiée par l'ajout de ces fonctionnalités nouvelles. C'est le cas de la sénescence de matière sèche qui ne s'applique plus qu'à une petite fraction de la matière sèche présente, ainsi que des formalismes qui régissent la demande des organes (surface spécifique et proportion tige/feuilles en matière sèche structurale), qui ont une action importante sur le ralentissement de croissance et la sénescence sur pied, essentielle à estimer en repousse longue. L'introduction de processus nouveaux doit permettre de mieux simuler le comportement des couverts soumis à des sécheresses intenses et durables ou à des températures très élevées, mais nécessite l'usage d'expérimentations spécifiques, dont certaines sont déjà en cours.

Références

- Brisson N., Wery J., Boote K.W. (2006) "Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach". In "Working with crop models", D. Wallach, D. Makowsky, J.J. Jones Eds. Elsevier: 261-284.
- Devienne-Barret F., Justes E., Mchet J. M., and Mary B. (2000) "Integrated control of nitrate uptake by crop growth rate and soil nitrate availability under field conditions?" , *Ann Bot.*, 86: 995-1005.
- Duru M., Ducrocq H., Tirilly V. (1995) "Modelling growth of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) and tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) at the end of spring in relation to herbage nitrogen status", *J. Plant Nutrition*, 18: 2033-2047.
- Lemaire et Gastal (1997) N uptake and distribution in Plant canopies In : G.LEMAIRE (ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crop*. Springer-verlag, Berlin, 3-43.
- Ruget F., Novak S., Granger S. (2006) "Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée", *Fourrages*, 186: 241-256.
- Voltaire F, Norton M. (2006) Summer dormancy in perennial temperate grasses, *Ann. Bot.*, 98: 927-933.

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET PRATIQUES AGRICOLES : REGARDS

VERS LE PASSE ET LE FUTUR

CLIMATE CHANGE AND CROP MANAGEMENT: LOOK TOWARDS THE PAST AND THE FUTURE

N. Brisson*, **S. Gervois****, **R. Diaz*****, **M. Benoit******

* INRA, Agroclim Site Agroparc, F-84914 Avignon (brisson@avignon.inra.fr)

** LCSE CEA Saclay *** INTA Castellar Argentine **** INRA, Mirecourt France

Introduction

L'industrialisation a profondément modifié la relation entre le climat et la productivité agricole. En effet, jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, les aléas climatiques pilotaient les rendements, aux aléas sanitaires près (mildiou, phylloxéra, doryphores,...). Puis, l'utilisation d'engrais naturels à partir de 1860 (guano, salpêtre) mais surtout d'engrais de synthèse, après la seconde guerre mondiale a permis une forte augmentation des rendements, substituant ainsi la subordination de l'agriculture au climat à celle de l'agriculture aux pratiques de l'agriculteur. L'amélioration variétale, les protections phytosanitaires et le recours à l'irrigation ont également accompagné cette mutation. Ainsi, dans un contexte climatique supposé stationnaire, on analysait dans les années 70-80 le déterminisme de l'évolution des rendements céréaliers comme résultant d'une tendance à long terme représentant « le progrès » (quantifiée par la régression linéaire des rendements en fonction du temps) et d'une variance autour de cette tendance, représentant les aléas climatiques. Or l'évolution attestée du climat au cours du siècle dernier et les perspectives d'évolution future nous conduisent à investir cette question du poids relatif des composantes techniques de l'agriculture par rapport au changement climatique.

Cette problématique intéresse à la fois le passé et l'avenir. En ce qui concerne le passé, il s'agit d'apprécier le poids du réchauffement de l'ordre de 0.8°C et de l'augmentation de la concentration en CO₂ de 300 à 370 ppm, depuis le début du XX^{ème} siècle, sur l'évolution des rendements. Quant à l'avenir, la question est d'avantage centrée sur le potentiel d'adaptation aux climats futurs offert par les techniques. Cette question est particulièrement pertinente pour les cultures annuelles pour lesquelles la maîtrise du positionnement du cycle cultural autorise une relative plasticité pour s'adapter au climat.

Cet exposé s'appuiera sur des travaux français récents sur le changement climatique et son impact en agriculture, dans le cadre de collaborations entre des spécialistes du climat et des agronomes. Ces travaux sont basés sur des modélisations explicites de l'agrosystème, sur le climat observé (pour le passé) ou simulés en fonction des hypothèses de forçage radiatif issus des scénarios de l'IPCC (pour le futur), et sur des scénarios techniques et génétiques réalistes pour les systèmes de culture céréaliers.

Analyse du passé

Pour réaliser cette analyse, Gervois (2004) a utilisé le modèle ORCHIDEE-STICS (Gervois et al., 2004 ; De Noblet et al., 2004) pour le blé et le maïs, à l'échelle européenne, forcé par un jeu de données climatiques centenaires de 1901 à 2000 mis à disposition par le projet européen ATEAM. Les hypothèses d'évolution des techniques adoptées sont basées sur l'histoire de l'agriculture française (Boulaine, 1996). Elles concernent tout d'abord la fertilisation, supposée uniquement organique et issue des effluents d'élevage jusqu'en 1950, puis minérale ensuite, avec des doses croissantes au cours du temps de 30 à 150 kg ha⁻¹. Parallèlement, l'irrigation n'est permise qu'à partir de 1950, avec des doses qui couvrent progressivement les besoins en eau des cultures. De façon très synthétique, on suppose que l'amélioration génétique a touché essentiellement la longueur du cycle et en particulier la durée de remplissage des grains et l'indice de récolte. Ainsi, jusqu'en 1980 l'auteur utilise une variété à cycle court, remplacé ensuite par une variété à cycle plus long ; et il fait varier progressivement l'indice de récolte final de 0.25 en 1950 à 0.45 en 2000. Il réalise trois simulations centenaires permettant de dissocier les effets i) de la seule augmentation du CO₂ (climat et pratiques de 1901 imposés) ; ii) de l'évolution climatique (CO₂ et climat évolutif mais pratiques 1901 imposées) et iii) de l'évolution des pratiques (CO₂, climat et pratiques évolutifs). Les résultats reproduits sur la figure 1 pour le blé en France démontrent clairement le fort impact des pratiques en accord avec les données statistiques agricoles (source : IIA jusqu'en 1948 puis FAO). Ces résultats ont également des conséquences sur le stockage potentiel de carbone dans les sols et leur réserve en eau (Gervois et al. en préparation). Ils mettent également en évidence un écart croissant entre végétation naturelle et agricole.

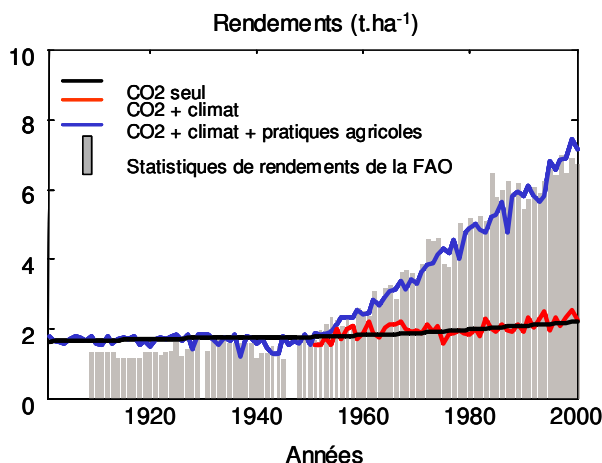


Figure 1 : Comparaison de l'évolution des rendements de blé français (sources : IIA jusqu'en 1948 puis FAO avec les simulations introduisant progressivement les sources d'évolution (CO₂, climat, pratiques)

Prospective sur le futur

Les connaissances des fonctions de réponse du système sol-culture aux facteurs du climat (CO₂, température et pluviométrie) à court et long termes nous renseignent sur les processus susceptibles d'être modifiés de façon significative (Seguin et al., 2005) : stimulation de la photosynthèse, déplacement des fenêtres de fonctionnement par rapport aux paliers d'optima thermiques, accélération du développement, modification du bilan hydrique par des effets à la fois source (pluviométrie) et puits (demande climatique), modification du bilan azoté par augmentation des besoins en azote des plantes et stimulation de la minéralisation... A l'échelle de la succession de cultures, d'autres processus peuvent intervenir. Ainsi la modification de la pluviométrie est susceptible de jouer sur les fenêtres des jours disponibles pour réaliser les travaux agricoles d'implantation printanière et de récolte automnale, avec des conséquences sur les risques de tassement des sols par les engins. De plus ces travaux sont également reliés aux choix variétaux et/ou à la date de semis pilotant la longueur des cycles et le réchauffement des sols au printemps. En cours de culture, ce sont surtout les schémas de fertilisation et d'irrigation qui peuvent être modifiés par les effets de l'évolution climatique. De plus, les stress biotiques (maladies, ravageurs et adventices) peuvent changer de nature ou se manifester à des périodes du cycle différentes. La prise en compte de cette nouvelle donne climatique est à intégrer dans la rationalisation des méthodes de lutte et de contrôle préconisée dans le cadre d'une agriculture plus raisonnée. Enfin, les préconisations actuelles visant à mieux gérer l'eau et l'azote du sol pendant l'inter-culture (cultures intermédiaires pièges à nitrate, réduction de la durée de sol nu par allongement des cycles) peuvent être remises en cause ou au contraire renforcée selon le sens des modifications de pluviométrie : par exemple privilégier une stratégie de couverture végétale au nord pour piéger les nitrates et de sol nu au sud pour économiser l'eau.

Culture Climat	Maïs (n=21)		Blé (n=7)	
	Passé	Futur	Passé	Futur
Date de récolte	19/10	10/10	30/07	14/07
Biomasse aérienne (t ha ⁻¹)	11.4	17.8	17.7	17.6
Rendement (t ha ⁻¹)	4.2	9.0	6.6	6.5
Absorption d'azote (kg N ha ⁻¹)	164	199	263	252
N-NO ₃ sous la zone racinaire (kg N ha ⁻¹)	55.3	55.7	147.6	170.3
Satisfaction des besoins en azote (%)	90	86	92	87
Cumul de rayonnement intercepté (MJ m ⁻²)	532	639	609	529

Tableau 1 : Simulations des performances agronomiques des cultures du maïs et de blé en utilisant le modèle STICS alimenté par les scénarios climatiques du modèle ARPEGE-Climat et les pratiques actuelles dans le cadre d'une rotation maïs-maïs-maïs-blé sur le plateau Lorrain

Pour hiérarchiser cet ensemble complexe dans un contexte régional défini (plateau lorrain), nous avons utilisé le modèle de culture STICS (Brisson et al. 2003) forcé par les données climatiques issues du modèle ARPEGE-Climat (Gibelin et Déqué, 2001) pour les deux périodes de référence : 1961-1990 et 2070-2099 (obtenue sous forçage de 660 ppm de CO₂). Nous avons étudié une rotation simple quadriennale

(maïs, maïs, maïs, blé) sur 30 ans, en partant des pratiques actuelles. Les résultats, synthétisés dans le tableau 1, montrent clairement des réponses opposées pour le maïs et le blé, le maïs bénéficiant de l'évolution climatique, au contraire du blé. Ce contraste marqué est lié aux variations de phénologie : celle-ci est allongée dans la cas du maïs, en limite de son aire de culture dans cette région actuellement, et raccourcie pour le blé. Les deux cultures ont plus de mal à satisfaire leurs besoins en azote dans l'hypothèse du climat futur.

Climat	Passé	Futur
Période de semis	[25/09 - 09/10]	[26/09 - 19/10]
Période du second apport	[19/03- 04/04]	[25/02 - 15/03]
Dose totale (kg N ha ⁻¹)	[223 – 259]	[342 – 358]
Rendement (t ha ⁻¹)	[7.1 – 7.9]	[10.0 – 11.0]

Tableau 2 : Simulations d'une adaptation des pratiques de la culture du blé (semis, apports d'azote) en vue d'une maximisation du rendement

L'étude de l'adaptation des pratiques au contexte climatique futur a permis d'évaluer le décalage des périodes optimales de semis et de proposer un nouveau schémas de fertilisation prenant en compte l'augmentation des besoins de la plante mais aussi de la fourniture du sol via la minéralisation (le tableau 2 donne l'exemple du blé). Ces résultats montrent qu'une adaptation des pratiques permet de valoriser le changement climatique.

Conclusion

L'impact de l'évolution du climat sur l'agriculture ne peut se raisonner indépendamment des pratiques agricoles. Ces dernières assurent une grande plasticité aux cultures annuelles en particulier. Cependant, cette plasticité ne doit pas constituer un prétexte pour ne pas investir la question de l'impact du changement climatique, car dans un contexte de changement global la modification des pratiques peut aussi avoir un impact notable sur d'autres composantes du système (environnement, temps de travail,...).

Références

- Boulaine J. (1996) Histoire de l'agronomie en France
 De Noblet-Ducoudré N. et al. (2004) *Agronomie* 24: 397-407
 FAO (2002) FAOSTAT Food and Agricultural Organization statistical database CD-ROM
 Gervois S. et al. (2004) *Earth Interactions* 8: 1-25
 Gervois S. (2004) Thèse de Doctorat : Université Paris VI
 Gibelin A.L., Déqué M. (2001) Centre National de Recherches Météorologiques : Note de Travail 79. 64 pp.
 IIA 1960 Annuaire international de la statistique agricole
 Brisson N. et al. (2003) *European Journal of Agronomy* 18, 309-332. (I)
 Seguin B et al. (2005) Actes du symposium du Collège de France, Paris, 12-13 oct 2004, ed. Odile Jacob (177-203)

CARACTERISATION AGROCLIMATIQUE DE L'IMPACT DES PHENOMENES ENSO SUR LA VITICULTURE CHILIENNE AVEC LE MODELE STICS

AGROCLIMATIC CHARACTERIZATION OF THE IMPACT OF THE ENSO PHENOMENA FOR CHILEAN VINEYARD WITH THE STICS MODEL

N. Brisson *, P. Gonzales-Colville **, S. Ortigas-Farias**, I. Garcia de Cortazar*, D. Ripoche*

* INRA, Agroclim Site Agroparc, F-84914 Avignon (brisson@avignon.inra.fr)

** CITRA Université de Talca, Casilla 721, Region del Maule Chili

Introduction

Alors que dans l'hémisphère nord le changement climatique se manifeste clairement par un réchauffement, dans l'hémisphère sud, la circulation atmosphérique, due principalement aux mouvements des masses océaniques, fait que le changement climatique apparaît d'avantage comme une augmentation de fréquence des années extrêmes très humides ou très sèches. L'impact de ces événements, plus connus sous les appellations de « El Niño » (années humides et fraîches) et « La Niña » (années sèches et chaudes) (ou encore ENSO pour El Niño Southern Oscillation), sur l'agriculture en général et la viticulture en particulier, n'est pas si clair au Chili. L'une des explications peut être l'utilisation intensive de l'irrigation qui masque les effets néfastes des années sèches. Une autre explication est que ces événements ne sont pas toujours précisément en phase avec le cycle de la vigne qui couvre deux années calendaires (Gonzales-Colville, 2004). Nous avons utilisé le modèle STICS, adapté et paramétré pour plusieurs génotypes (Garcia de Cortazar, 2007), pour analyser si les événements ENSO avaient un impact prédictible sur les performances de la culture.

Matériels et méthodes

L'étude a été réalisée dans la région du Maule, région viticole de la partie centrale du Chili, à partir d'une série climatique de 21 ans (1982-2002) de données de la station de Talca, qui a fourni les entrées dynamiques du modèle STICS. Le sol, le cépage (Merlot) et les pratiques (en particulier l'irrigation) ont été choisis de façon à se conformer à la réalité agricole locale. Les sorties du modèle ont été validées par les experts locaux et un travail de validation expérimentale est actuellement en cours. La vendange se simule quand la teneur en sucre est de 25%, ce qui correspond à environ 13,5 degrés alcooliques. Le modèle a tourné en continu sur l'ensemble de la série climatique afin que des effets cumulatifs d'état du sol ou des réserves hivernales de la plante puissent être pris en compte.

Les sorties d'intérêt du modèle peuvent être classées en i) variables phénologiques (débourrement, floraison, véraison, maturité), ii) variables micrométéorologiques (température et humidité dans le couvert ainsi que le rayonnement intercepté), iii) production en termes de quantité, de teneur en sucre et d'indicateur de qualité et enfin iv) les variables hydriques (transpiration, évaporation, stress hydrique).

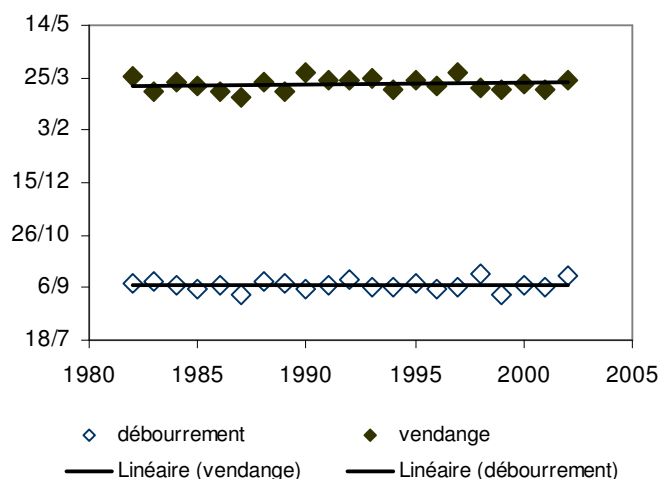


Figure 1 : Dates de débourrement et de vendange simulées par le modèle STICS sur l'ensemble de la série climatique de Talca

Après avoir constaté qu'il n'y avait pas d'évolution perceptible dans le calendrier de déroulement des cycles (Figure 1), contrairement à ce qui a été démontré à plusieurs reprises en France (Jones et Davis, 2000; Duchêne et Schneider, 2005; Jones *et al.*, 2005), nous avons scindé notre jeu de données en 3 lots en fonction du classement climatologique des experts : 8 années « Niño », 8 années « Niña » et 5 années « normales » que nous avons supprimées de notre analyse. Les analyses statistiques sont en majorité des tests de comparaison de moyenne des variables d'intérêt entre les lots « Niño » et « Niña » utilisant des seuils de 95% (notations a/b) ou 90% (notations a/c), ainsi que des analyses de corrélations.

Résultats et discussion

Recherche de variables, caractérisant l'impact des phénomènes climatiques, basées sur la phénologie

Comme le montre le tableau 1, les années « Niña » semblent être plus précoces que les années « Niño » mais seul le stade « véraison » l'est de façon significative.

	débourrement	floraison	véraison	vendange	Durée du cycle (j)
Niña	10/09 a	16/11 a	25/01 a	18/03 a	188 a
Niño	07/09 a	20/11 a	31/01 b	23/03 a	197 b

Tableau 1 : dates moyennes d'apparition des stades phénologiques et de la vendange, ainsi que la durée du cycle (vendange – débourrement)

Si nous regardons les conditions climatiques spécifiques des phases ainsi définies, en termes de somme ou de moyennes (tableau 2), peu d'indices significatifs ressortent. Toutefois il apparaît que la température maximale entre floraison et véraison est significativement plus élevée pendant les années « Niña » et que l'humidité pendant la maturation est plus élevée en conditions « Niño ».

phase	ENSO	Tair minimale (°C)	Tair maximale (°C)	Pluie (mm)	Rayonnement incident (MJm ⁻²)	Humidité air (%)	Tcouvert maximale (°C)	Rayonnement intercepté (MJm ⁻²)	Humidité couvert (%)
Débourrement	Niña	7.8 a	21.8 a	69 a	1380 a	72 a	24.4 a	90 a	64 a
-floraison	Niño	7.1 a	21.4 a	92 a	1495 a	76 a	23.9 a	100 a	68 a
Floraison	Niña	11.8 a	29.2 a	9 a	2015 a	58 a	32.3 a	393 a	55 a
-véraison	Niño	11.5 a	28.4 b	23 a	2032 a	62 a	31.3 b	417 b	59 a
Véraison	Niña	11.1 a	28.6 a	24 a	1427 a	61 a	30.9 a	314 a	58 a
-vendange	Niño	10.8 a	28.1 a	22 a	1410 a	66 c	30.2 a	342 c	62 a

Tableau 2 : Conditions climatiques et microclimatiques pendant les phases de développement en termes de moyennes (température, humidité) ou de cumul (pluie, rayonnement)

Si nous nous rapprochons des conditions climatiques perçues par les plantes, en analysant la température maximale du couvert, le rayonnement intercepté par le feuillage et l'humidité au niveau de la plante (tableau 2), la floraison-véraison apparaît toujours comme la période la plus corrélée aux événements ENSO. Le rayonnement intercepté pendant l'ensemble de la post-floraison semble être en faveur des années « Niño » à cause de la durée plus grande de la croissance et de la maturation des baies et peut être aussi du positionnement calendaire de ces phases. Il est étonnant que l'humidité au niveau des plantes pendant la maturation n'apparaisse pas comme discriminante des phénomènes ENSO car l'humidité de l'air l'est et qu'il existe une très forte corrélation ($r^2=0.95$) entre les deux variables.

Ainsi les variables discriminant les deux types d'années sont au nombre de 7, mais évidemment elles ne sont pas indépendantes entre elles. Une analyse des corrélations (tableau 3) montre que cet ensemble peut se résumer à 3 indicateurs : la date de véraison, et les conditions d'humidité et de rayonnement intercepté pendant la maturation.

	Véraison	Longueur cycle	Tmaxi (2)	Humidité (3)	Tmaxi cult (2)	Rad inter (2)	Rad inter (3)
Véraison	1						
Longueur cycle	0.75**	1					
Tmaxi (2)	-0.73**	-0.58**	1				
Humidité (3)	0.45*	0.46*	-0.49*	1			
Tmaxi cult (2)	-0.73**	-0.57**	0.97**	-0.4	1		
Rad inter (2)	0.66**	0.49*	-0.6**	0.44*	-0.56**	1	
Rad inter (3)	0.21	0.25	-0.24	0.08	-0.23	0.56**	1

Tableau 3 : Corrélations (r^2) entre les indicateurs agroclimatiques de la vigne discriminant les phénomènes ENSO : ** significatif à 95%, * à 90%. Les numéros 2 et 3 font références respectivement aux phases floraison-véraison et véraison-vendange

Relations avec les variables de production quantitatives et qualitatives et les variables de fonctionnement

Les variables de production et de fonctionnement ne semblent pas être reliées directement significativement au caractère ENSO des années (Tableau 4 : sauf la température minimale pendant la maturation qui, avec l'amplitude, peuvent être utilisées comme indicateurs de la qualité du raisin à la vendange). Cependant la corrélation de certaines de ces variables avec les indicateurs définis précédemment est, elle, significative. Il s'agit essentiellement du rendement et des indices de qualité. La figure 2 permet de matérialiser ces relations. Une série supplémentaire de simulations a été réalisée sous l'hypothèse que la vendange s'effectuait à l'arrêt complet de la croissance des baies en matière sèche (dénommé maturité), ce qui nous a permis de calculer l'écart, en jours, entre la vendange et la maturité. Il est intéressant de remarquer que cet écart est presque doublé en année « Niño », signifiant que le raisin est récolté dans un état de maturité moindre qu'en année « Niña ». Combiné à la différence de l'indicateur de nuits fraîches (Température minimale moyenne) pendant la maturation, cette information confirme la probable différence de qualité entre les deux types d'années (surtout en ce qui concerne les autres composantes de la qualité du raisin: acidités, aromes... : Garcia de Cortázar Aauri, 2006).

variables	valeurs		Coefficients de corrélation		
	Niña	Niño	Date de véraison	Humidité maturation	Rayonnement intercepté maturation
Rendement (t/ha)	9.2 a	10.6 a	-	0.63**	-
Tmin maturation (°C)	11.5 a	10.9 b	-0.75**	-	-
Amplitude thermique maturation (°C)	20.3 a	19.8 a	-	-	-
Transpiration(mm)	174 a	178 a	-	-	0.43*
Evaporation (mm)	157 a	164 a	-	-	-
stress hydrique	0.87 a	0.86 a	-	-	-
irrigation (mm)	121 a	119 a	-	-	0.47*
Vendange-maturité ¹ (jours)	-8 a	-14 a	-0.67**	-	-0.57**

Tableau 4 : Comportement des variables liées à la production et au fonctionnement hydrique de la vigne vis-à-vis du caractère ENSO de l'année, soit directement par comparaison de moyennes (2 premières colonnes), soit indirectement par corrélation (r^2) avec les indicateurs identifiés (3 dernières colonnes avec ** significatif à 95%, * à 90%). ¹ Il s'agit du nombre de jours séparant la vendange et la maturité définie comme l'arrêt d'accumulation de sucre dans les baies.

En ce qui concerne les rendements, ils ont tendance à être plus élevés en années « Niño ». Le fonctionnement hydrique ne paraît pas très différent entre les deux types d'années car la longueur du cycle des années « Niño » compense le déficit en eau des années « Niña » de sorte qu'au final les cumuls sont voisins. Par ailleurs l'utilisation de l'irrigation masque en partie les effets de sécheresse du climat pour les années « Niña » (augmentation de la température de culture et diminution de la transpiration).

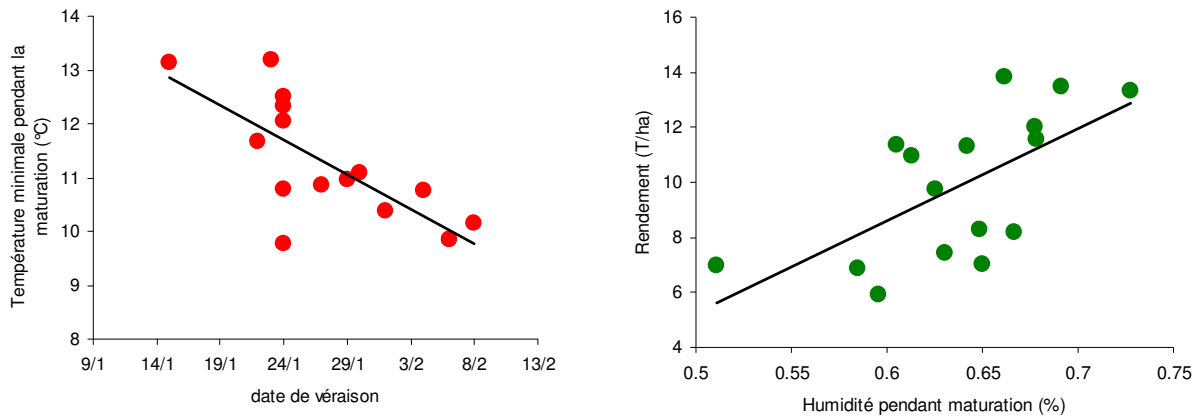


Figure 2 : Relations significatives entre des indicateurs mis en évidence des phénomènes ENSO (date de véraison et humidité pendant la maturation) avec des variables de production en quantité et qualité (nuit fraîche)

Conclusion

Les résultats présentés confirment le sentiment qu'il existe un effet des événements ENSO sur le comportement de la vigne au Chili. Mais nous montrons que ces effets sont subtils, concernant surtout la phase post véraison : la tendance est à un rendement plus important mais peut être de moindre qualité en année « Niño ». De plus la mise en évidence de conditions plus humides laisse penser à des risques de développements de maladies (oïdium, botrytis) pendant ces mêmes années.

Le modèle STICS démontre ainsi tout son intérêt dans un cadre prospectif, il permet une interprétation des données climatiques brutes dans un contexte appliqué, ici à la vigne.

L'ensemble de l'étude a reposé sur une classification climatique des années basée sur l'analyse des champs de pression dans le Pacifique sud : c'est sans doute une source d'incertitude par rapport à la climatologie réelle du site mais en même temps cela permet de se mettre dans de véritables conditions de prévision météorologique.

Références

- García de Cortázar Atauri I. (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie de Montpellier. 347pp
- Gonzales-Colville P. (2004) Behavior of the cold-hours, degree-days, frosts and precipitations in the region del Maule's agrosystems during the events El Niño 1997 and La Niña 1998-1999. In S. Avaria, J. Carrasco, J. Rutillant and E. Yanes (eds). "El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile". CONA, Chile, Valparaiso: 231-252.
- Jones G.V., Davis R.E. (2000) Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. *Amer. J. Enol Vitic.* 51(3):249-261.
- Jones G.V., Duchene E., Tomasi D., Yuste J., Braslavksa O., Schultz H., Martinez C., Boso S., Langellier F., Perruchot C., Guimberteau G., (2005) (b) Changes in European Winegrape Phenology and Relationships with Climate. *Proceedings of 4th Gesco. Vol. I. Germany.* 55-62pp.
- Duchêne E., Schneider C. (2005) Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agron. Sustain. Dev.* 25:93-99.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de collaboration bilatéral ECOS entre l'INRA et l'Université de Talca

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CONSEQUENCES DE LA DEGRADATION DES SOLS PAR TASSEMENT (CAS D'ETUDE EN PICARDIE)

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE CONSEQUENCES OF SOIL DEGRADATION BY COMPACTION (CASE STUDY IN PICARDIE)

N. Brisson *, I. Echeverria*, F. Huard*, G. Richard**

*INRA, Unité Agroclim, Domaine St Paul, Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex 9

(brisson@avignon.inra.fr)

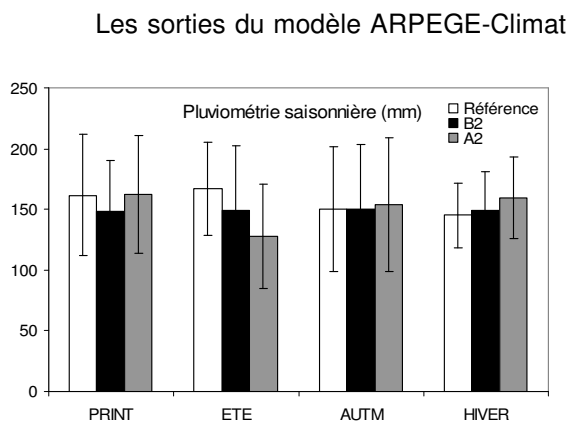
** INRA, UR0272 Science du Sol, F-45166 OLIVET CEDEX

Introduction

Les modèles climatiques prédisent des modifications de pluviométrie très variables dans le temps et dans l'espace (Terray et Braconnot, 2007). Pour ce qui concerne l'Europe, il est annoncé une augmentation de pluviométrie au nord et une diminution autour de la Méditerranée. La France est au centre de ces tendances opposées et c'est également à ces latitudes que les modèles climatiques divergent, en particulier s'agissant de la pluviométrie d'automne et d'hiver. Or au plan agronomique cette pluviométrie est importante car en plus de conditionner l'état du réservoir sol au moment des fortes poussées de croissance printanières, elle peut engendrer des dégradations du sol si les agriculteurs sont conduits à effectuer les travaux agricoles en conditions trop humides. Ces risques de dégradation du sol par tassement existent, en particulier, pour les opérations de semis et de récolte des cultures d'été (type maïs et betterave). Avec la version du modèle STICS qui tient compte de l'évolution de la structure du sol (voir Richard et al., ce document), nous avons analysé la réponse de variables d'intérêt agronomique et environnemental au tassement et l'impact des changements climatiques à cette réponse, pour des monocultures de blé et de maïs en Picardie, sans adaptation de pratiques (Echeverria, 2006).

Matériels et méthodes

Scénarios de changement climatique



Les sorties du modèle ARPEGE-Climat pour les scénarios B2 et A2, correspondant respectivement à 660 et 850 ppm de CO₂ à la fin du XXI^{ème} siècle, ont été combinées à la série climatique de Mons en Chaussée (données INRA-Agroclim) par la méthode des biais calculés sur une période commune de 10 ans (1986-2005) entre simulations et mesures (Huard, 2007). Cette méthode permet de disposer de 3 séries trentenaires : la série de référence (1969-1999) et les deux scénarios futurs (2070-2099). Bien qu'en moyenne annuelle la pluviométrie tende à diminuer dans le futur (624, 597 et 604 mm respectivement pour la série de référence et les scénarios B2 et A2), la Figure 1 montre que la pluviométrie hivernale, elle, augmente.

Figure 1 : Variabilité de la pluviométrie saisonnière pour les trois séries (référence, B2 et A2)

Les protocoles de simulation agronomiques

Des monocultures de blé (*cv Talent*) et de maïs (*cv Passat*) ont été simulées en continu pendant les 30 ans des séries. Les opérations successives de labour, de préparation du lit de semence et de semis ont été simulées les 16 (30cm), 17 (8cm) et 30 octobre pour le blé et 20 (20cm), 27 (5cm) mars et 3 avril pour le maïs. Les fertilisations appliquées, à des stades phénologiques, sont pour le blé de 170 kgN ha⁻¹ en 3 apports et pour le maïs 140 kgN ha⁻¹ au semis. La culture du maïs a été récoltée au plus tard le 31 octobre. L'ensemble de ces itinéraires techniques est une synthèse de la base de données des pratiques de l'unité expérimentale de Mons en Chaussée (H. Boizard, com. pers.)

La description du sol et de ses variantes tassées

Le sol de base (Tableau 1) est un sol de loess profond, peu organique, à forte capacité de rétention en eau. A partir de ce sol, des structures de surface correspondant à des masses volumiques croissantes de la couche travaillée (de 1.1 à 1.6 gcm⁻³) ont été dérivées par une variation logique des paramètres appropriés (Richard et al., ce document).

Sub_surface	NORG(%)	PROFHUM(cm)	CALC(%)	ALBEDO	Q0 (mm)	ZESX (cm)
	.09	30	.1	.25	3.84	25
EPC(cm)	HCCF(%)	HMINF(%)	DAF	INFIL(mm)		
10	23.5	9.8	1.3	3.5		
20	23.5	9.8	1.3	3.5		
30	23	10.2	1.53	2.1		
30	22.6	10	1.6	5		
100	22.6	10.5	1.6	5		

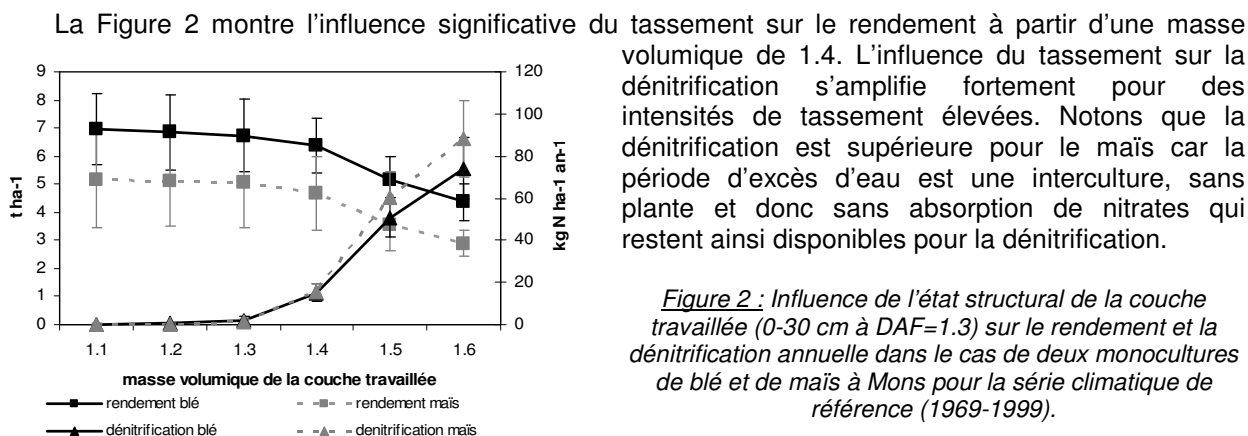
Tableau 1 : Paramètres du sol de base de Mons en Chaussée. En gras : paramètres modifiés en cas de modification des masses volumiques des 2 premiers horizons.

Les deux types de simulation

Un premier jeu de simulations a consisté à faire tourner le modèle sur les 6 sols de masse volumique croissante sans prendre en compte les modifications de structure en cours de cycle, et ce pour les 3 séries climatiques. Un second jeu de simulation a consisté à utiliser le sol initialement le plus tassé (1.6) et à simuler les effets structurants des opérations de travail du sol, ou déstructurant des passages des engins de semis et de récolte en s'appuyant sur des seuils d'humidité au-delà desquels se produit le tassement (25.5 % et 23.5 % respectivement pour les engins de semis et de récolte, masse volumique résultante de 1.6 sur les 2 premiers horizons).

Résultats

Réponses agro-environnementales à un tassement progressif



Impact du travail du sol

Les situations précédentes restent théoriques car le travail du sol restructure périodiquement le sol. Le bénéfice des opérations de travail du sol est remarquable sur la circulation de l'eau et la dénitrification (Tableau 2). On s'aperçoit que le blé profite d'avantage que le maïs du travail du sol car, compte tenu de son calendrier, il est peu soumis aux tassements. A contrario la parcelle de maïs est régulièrement retassée. On remarquera l'augmentation de la variabilité interannuelle liée au fait qu'en prenant en compte le travail du sol et le tassement intermittent par les engins, on simule des interactions supplémentaires avec les variables climatiques.

		Rendement (t ha ⁻¹)	Dénitrification (kg N ha ⁻¹ an ⁻¹)	Ruissellement (mm an ⁻¹)	Infiltration profonde (mm an ⁻¹)
blé	Tassement permanent	4.38 (0.66)	74 (14)	113 (41)	27 (32)
	Travail du sol	6.30 (1.47)	15 (31)	12(22)	119 (66)
maïs	Tassement permanent	2.88 (0.47)	88 (18)	63 (36)	10 (19)
	Travail du sol	3.82 (1.16)	49 (49)	25 (24)	84 (61)

Tableau 1 : Impact d'un labour annuel sur les valeurs moyennes (et leur variation interannuelle) de rendement, de dénitrification, de ruissellement et d'infiltration profonde : comparaison d'un sol tassé en permanence à la masse volumique de 1.6 sur l'ensemble de la couche travaillée avec un sol tassé de façon intermittente en fonction de son état hydrique lors des opérations culturales

En conditions climatiques futures....

Si le changement climatique a tendance à induire une augmentation des rendements (Figure 2, sol nominal de masse volumique 1.3), il est clair que le tassement diminue voire annule cet effet bénéfique. Cependant, les comportements des cultures de blé et de maïs sont très différents. Le maïs valorise mieux le changement que le blé par des augmentations de rendement pouvant dépasser 50 % ; et si le tassement permanent lui est défavorable (Figure 2, sol à 1.6), l'alternance tassement - travail du sol (Figure 2, dernière série) semble apporter une plus-value au système dans le cas du scénario modéré (B2). Il s'agit d'une augmentation de la rétention en eau permettant à la culture de mieux négocier la sécheresse ultérieure. Le comportement du blé est en moyenne (et en relatif) assez peu variable dans les trois cas testés avec un meilleur comportement en B2 qu'en A2. Notons également que le changement climatique s'accompagne le plus souvent d'une augmentation importante de variabilité des rendements qui peut, à terme, rendre les systèmes de culture économiquement plus vulnérables.

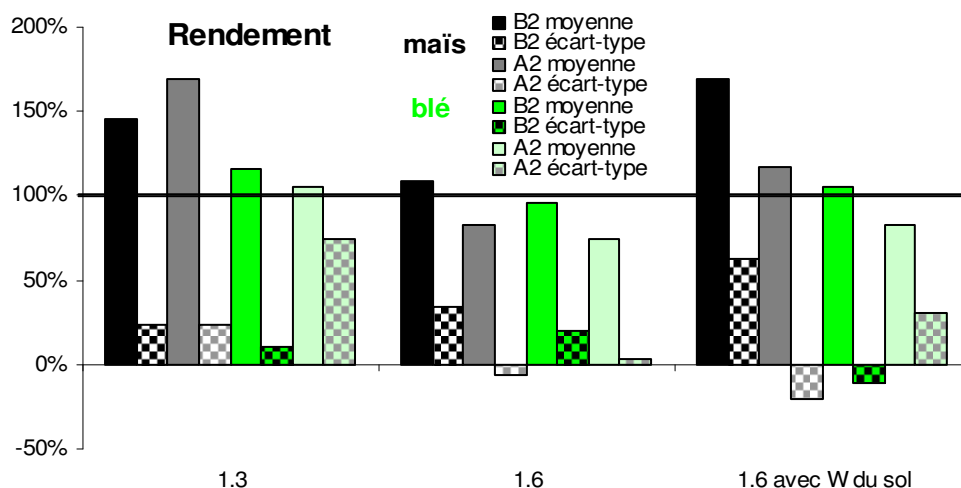


Figure 2 : Impact du changement climatique (scénarios B2 et A2) sur le rendement relatif (par rapport à la période de référence 1969-1996) du blé et du maïs en moyenne et en variabilité interannuelle pour différentes hypothèses de tassement de la couche travaillée

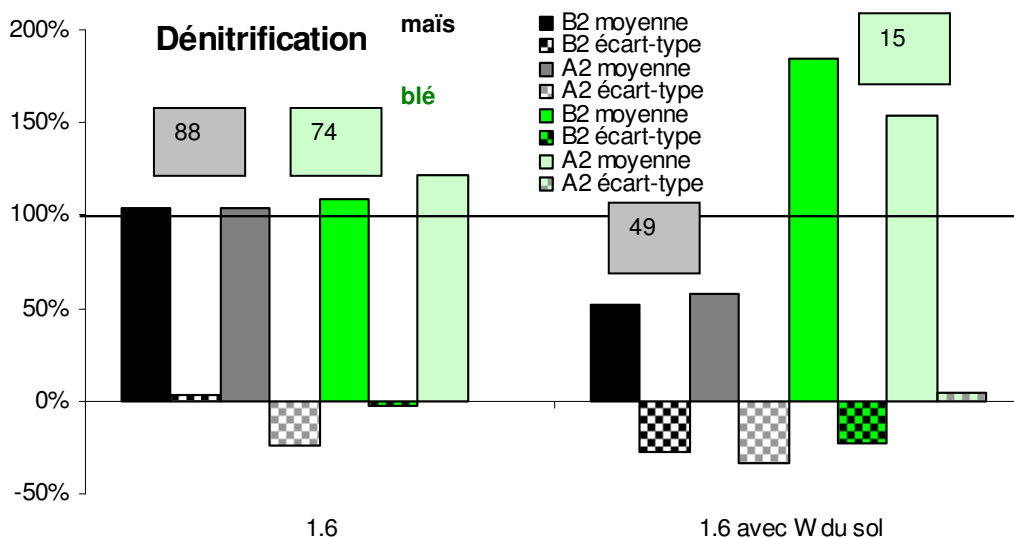


Figure 3 : Impact du changement climatique (scénarios B2 et A2) sur la dénitrification annuelle relative (par rapport à la période 1960-1990) en moyenne et en variabilité interannuelle pour différentes hypothèses de tassement de la couche travaillée. Les chiffres encadrés correspondent aux valeurs absolues

En ce qui concerne les impacts environnementaux du tassement, la Figure 3 montre que sans travail du sol, le changement climatique risque d'augmenter la dénitrification à cause de l'augmentation de la quantité de pluie hivernale (Figure 1). Cette augmentation de la dénitrification est systématique (peu de variabilité). Le travail du sol a donc un effet bénéfique, même s'il ne permet pas d'annuler complètement l'impact des hivers pluvieux pour le blé (attention il s'agit de faibles quantités).

Références

Echeverria I.(2006) rapport de stage Université de Madrid
 Huard F (2007).Note technique Agroclim n 2
 Richard G. et al,(2007) Séminaire STICS
 Terray et Braconnot, (2007) Livre Blanc Escrime.

Remerciements

Les auteurs remercient les programmes français GESSOL2 du Ministère en charge de l'environnement et ADD de l'Agence Nationale de la Recherche pour leur soutien au projet DST (Dégradation des Sols liée au Tassement) au sein duquel le travail a été effectué.

EVALUATION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES DIFFERENTS VIGNOBLES DE FRANCE

EVALUATION OF THE IMPACTS OF THE CLIMATIC CHANGE IN THE VARIOUS VINEYARDS OF FRANCE

I. García de Cortázar Atauri ^{1*}, N. Brisson, O. Jacquet, JC. Payan, M. Claverie, E. Salançon, JC. Fournioux, C. Monamy, D. le Sueur, G. Barbeau, N. Bottois, V. Dumot, JP. Gaudillere, JP. Goutouly, C. Agut, B. Rodriguez-Lovelle, JP. Ramel, F. Huard, D. Ripoché, M. Launay, B. Seguin

¹Unité Agroclim, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914 Avignon
igarcia@avignon.inra.fr

Introduction

Les perspectives d'évolution du climat, à cause des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, ont des conséquences sur la croissance et la physiologie des espèces cultivées et donc sur la qualité et le rendement des récoltes (Olesen et Bindi, 2002 ; Perarnaud *et al.*, 2005). Ces quinze dernières années, les prévisions issues des modèles climatiques globaux se sont affinées et ont gagné en fiabilité, ce qui permet de conduire des études d'impact, en particulier dans le domaine agricole. Il semble à présent bien établi que la température moyenne va augmenter d'entre 1.5 et 6°C de 1990 à 2100 (l'ampleur de l'augmentation étant liée à nos capacités de régulation des émissions de gaz à effet de serre) (IPCC, 2001) et que les écarts de pluviométrie entre nord et sud de la France d'une part, et entre saisons d'autre part, vont s'accroître. Comme tous les végétaux, la vigne montre une stimulation de la photosynthèse liée à l'augmentation de la concentration du CO₂ (Bindi *et al.*, 2001). Cette augmentation n'aurait pas d'influence sur la transpiration (Schultz, 2000), ce qui confirme l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau, déjà observée pour d'autres plantes. Cependant, les études d'impacts réalisées jusqu'à maintenant présentent quelques limites. D'une part, les modèles agronomiques utilisés pour la vigne ne prenaient pas en compte les modifications du bilan hydrique (cas du modèle de Bindi) (Bindi *et al.*, 2000) et d'autre part, les travaux basés sur l'évolution des différents indices climatiques (en majorité thermiques) permettent d'avoir un aperçu général des modifications attendues dans le futur, mais ne tiennent pas compte du fonctionnement de la plante et de sa relation avec le milieu. A partir de ces constatations, il est donc important de mettre en relation l'ensemble des réactions biophysiques des éléments du système sol-climat-cépage-techniques culturales avec la modification des facteurs du climat ainsi que l'élévation du CO₂. Compte-tenu de la complexité des modifications induites par le changement climatique dans les interactions au sein du système viticole, il semble pertinent d'utiliser un modèle de culture mécaniste, dans notre cas le modèle STICS.

Matériel et méthodes

❖ *Le modèle STICS-vigne*

A l'INRA, depuis 2002, nous avons réalisé l'adaptation du modèle STICS à la vigne. Ce travail a été réalisé à l'échelle de la France et en collaboration avec différentes unités de recherche de l'INRA, ainsi que des partenaires techniques (instituts techniques, interprofessions...) et universitaires. Le travail d'adaptation a consisté à introduire l'adéquation de différents formalismes du modèle au fonctionnement de la vigne, ainsi qu'au paramétrage à partir d'un réseau de parcelles dans les différents vignobles de France : Côtes du Rhône, Languedoc, Bordeaux, Cognac, Bourgogne, Anjou, Champagne. Parallèlement, une base de données indépendante a été créée pour la validation du modèle. L'adaptation du modèle a été réalisée pour 8 cépages : Grenache, Syrah, Pinot Noir, Chardonnay, Cabernet Franc, Chenin, Merlot, Ugni Blanc. La description de l'adaptation et de la validation du modèle est détaillée dans García de Cortázar Atauri (2006).

❖ *Protocoles de simulation*

Pour réaliser notre étude d'impact, nous avons couplé le modèle STICS avec des données simulées du modèle de circulation générale (CGM) ARPEGE-Climat. Pour utiliser les données de ce modèle, nous avons appliqué la méthodologie des anomalies directes. Pour cela, nous avons récupéré des données réelles issues d'une station météorologique de chaque région viticole, ainsi que les données des séries Contrôle et des scénarios climatiques A2 et B2 simulés par le modèle ARPEGE-Climat correspondant à la même position géographique (García de Cortázar Atauri, 2006). Les données du modèle ARPEGE-Climat correspondent à la période 1970-1999 pour la série Contrôle et à la période 2070-2099 pour les scénarios futurs. Les données des séries réelles correspondent à la période 1970-2000 (Tableau 1).

Tableau 1 : Estimations des changements climatiques moyennés sur la France pour la période 2070-2099 (simulations climatiques Météo-France).

Scénario	Concentration atmosphérique en CO ₂ ppm	Élévation de Températures (°C)			Précipitations (%)		
		Année	Hiver	Été	Année	Hiver	Été
B2	500 à 600	2 à 2.5	1.5 à 2	2.5 à 3.5	-5 à 0	0 à +10	-25 à -5
A2	650 à 800	3 à 3.5	2.5 à 3	4 à 5	-10 à 0	+5 à +20	-35 à -20

L'étude d'impacts du changement climatique a été réalisée pour chaque région en prenant en compte les différentes configurations de plantations, de cépages et de qualité recherchée à la vendange (Tableau 2). Pour cela, nous avons choisi **1 cépage par région**, avec une teneur en sucre définie comme critère de vendange; lorsque cela était possible, nous avons choisi **2 sols** : un sol à faible réserve utile (fRU) et un sol à grande réserve utile (gRU); et **une densité de plantation** spécifique à chaque région, liée à **une hauteur du feuillage**. La distance entre les ceps sur le rang a été fixée à 1m et la hauteur de la base du feuillage a été adaptée en fonction du type de taille appliqué dans la région (cordon, guyot simple ou double, chablis). Nous avons introduit des spécificités techniques propres à chaque vignoble (éclaircissage, mulch).

Tableau 2 : Structure de techniques de base retenue pour chaque région (la plus proche de la réalité). Dans le cas de l'éclaircissage, s'il est réalisé, on élimine la moitié des grappes.

Régions	Cépages	Teneur en sucre vendanges	Sols	Densités et hauteur du feuillage	Eclaircissage	Paillage
Côtes du Rhône	Grenache	244.5g/L	fRU = 120 mm gRU = 232 mm	3333 ceps/ha avec 1.0 m hauteur du feuillage	Non ou Oui	Non
Languedoc	Grenache	244.5g/L	fRU = 97 mm gRU = 133 mm	3333 ceps/ha avec 1.0m hauteur du feuillage	Non ou Oui	Non
Bordeaux	Merlot	219.1g/L	Arg. = 183 mm Grv. = 175 mm	5000 ceps/ha avec 1.3m hauteur du feuillage	Non ou Oui	Non
Cognac	Ugni Blanc	166.3g/L	RU = 122 mm	3333 ceps/ha avec 1.5m hauteur du feuillage	Non	Non
Bourgogne	Pinot Noir	205.9g/L	RU = 110 mm	9090 ceps/ha avec 0.9m hauteur du feuillage	Non	Non
Anjou	Cab Franc	219.1g/L	fRU = 50 mm gRU = 176 mm	5000 ceps/ha avec 1.3m hauteur du feuillage	Non	Non
Champagne	Chardonnay	166.3g/L	RU = 144 mm	9090 ceps/ha avec 0.9m hauteur du feuillage	Non	Oui

Les variables de sortie étudiées sont relatives au développement (stades phénologiques et récolte), à la production de biomasse (végétative, des fruits, réserves), aux niveaux de stress abiotiques (hydrique et azoté), et aux conditions de la période de maturation (modification de la température dans la période véraison-vendange). Pour étudier d'une manière synthétique la période de maturation nous avons créé un indice de qualité climatique de la maturation : l'indice IQ_{climat} . Cet indice nous permet de synthétiser l'information de deux variables climatiques mesurées pour la période véraison-récolte : la température minimale de culture et le nombre de jours où la température maximale dépasse 37°C (arrêt du stockage de carbone dans les baies). L'indice est normalisé par rapport aux valeurs de ces deux variables mesurées dans chacun des vignobles pour l'année 2005 (année d'une bonne qualité de production). Cet indice a comme objectif de donner une information qualitative. Le calcul est décrit selon l'équation suivante:

$$IQ_{CLIMAT} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N -0.3 \ln \left(\frac{e^{\frac{TCULTMIN_n}{TCULTMIN_{05}}}}{e^{\frac{NB_{sup37n}}{NB_{sup37_{05}}}}} \right) - 0.7 \ln \left(\frac{e^{NB_{sup37n}}}{e^{NB_{sup37_{05}}}} \right)$$

où $TCULTMIN_n$ est la température de culture minimale moyenne de l'année n , $TCULTMIN_{05}$ est la température de culture minimale moyenne en 2005, NB_{sup37n} est le nombre de jours où la température de culture dépasse 37°C l'année n . Nous avons choisi d'utiliser la température de culture pour le calcul de cet indice, car c'est une variable de sortie du modèle qui va nous permettre d'avoir une information sur l'état hydrique de la plante. Si la valeur de IQ_{climat} est égale à 0, cela signifie que les conditions climatiques sont

les mêmes que celles observées en 2005; et plus la valeur s'éloigne de 0, plus les conditions climatiques diffèrent.

RESULTATS ET DISCUSSION

❖ *La phénologie et la date de vendanges.*

En ce qui concerne la phénologie, on assiste à un raccourcissement du cycle (en particulier de la période débournement – véraison) et à un avancement des différents stades (sauf de la sortie de dormance, qui est retardée à cause des hivers plus tempérés) dans toutes les régions pour tous les cépages étudiés. Cependant ces tendances ne sont pas de la même intensité selon la région et la période étudiées, avec deux groupes bien différenciés : les régions du Sud (Languedoc, Côtes du Rhône, Bordeaux et Cognac) et les régions du Nord (Anjou, Bourgogne et Champagne). En règle générale, le scénario A2 accentue les tendances apparues dans le scénario B2 (Tableau 3). Dans le cas de la Bourgogne, le faible avancement de la date de vendanges est surtout dû à la possibilité de vendanger avec une teneur en sucre plus élevée que celle utilisée dans le scénario Contrôle.

Tableau 3 : Déplacement des dates des différents stades phénologiques (en nombre de jours) et de la date de récolte des différentes régions pour les scénarios A2 et B2 par rapport aux résultats obtenus dans le scénario Contrôle C.

	Cotes du		Languedoc		Bordeaux		Cognac	
	Grenache		Grenache		Merlot		Ugni blanc	
	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)
Sortie de Dormance	21	11	24	13	22	12	20	14
Débour.	-17	-15	-10	-10	-8	-8	-17	-12
Floraison	-21	-18	-22	-19	-18	-15	-24	-18
Véraison	-33	-25	-31	-25	-31	-24	-38	-30
Récolte	-24	-18	-24	-19	-22	-16	-19	-12

	Dijon		Anjou		Reims	
	Pinot noir		Cabernet		Chardonnay	
	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)	A2 – C (Jours)	B2 – C (Jours)
Sortie de Dormance	20	12	19	12	23	14
Débour.	-27	-19	-27	-17	-31	-20
Floraison	-19	-14	-19	-12	-21	-16
Véraison	-40	-29	-38	-29	-48	-38
Récolte	-4	-2	-24	-17	-26	-18

Pour avoir un repère de l'envergure des impacts attendus, nous avons comparé ces résultats avec les données de la phénologie simulée pour les différents sites en 2003. Dans les régions des Côtes du Rhône Méridionales et du Languedoc, les prévisions des scénarios A2 et B2 montrent une précocité plus importante que celle observée en 2003. Dans les vignobles d'Anjou, Bordeaux et Cognac, le scénario B2 fournit des résultats semblables au développement observé en 2003, tandis que le scénario A2 simule un développement légèrement plus précoce. En Bourgogne, le scénario A2 simule le même développement que durant l'année 2003. En Champagne, l'année 2003 se présente comme une situation intermédiaire entre les scénarios A2 et B2. Nous nous sommes également interrogés sur la possibilité d'implantation d'autres cépages dans les différentes régions de France (données non montrées ici). Pour cela, nous avons simulé la phénologie du cépage Syrah dans chacune des régions, ce qui a montré que pour le scénario B2 (le moins pessimiste), la

culture de Syrah pourrait s'implanter dans les vignobles de Bordeaux et Anjou et dans le cas du scénario A2 l'adaptation pourrait s'étendre aux vignobles de Champagne et de Bourgogne.

❖ *Evolution de la production de biomasse et des stress azoté et hydrique (Tableau 4)*

D'une manière générale, la situation hydrique au début du cycle sera meilleure qu'actuellement, ce qui va favoriser la croissance végétative. Par contre, le stress hydrique va augmenter dans toutes les régions à la fin du cycle de la plante. L'évolution du stress azoté n'est pas aussi claire que celle du stress hydrique. Les seules régions dans lesquelles on observe une augmentation des stress azotés sont les régions de Bourgogne, Anjou et Champagne, en liaison avec l'importante demande d'azote par la plante pour sa croissance.

La production de biomasse végétative augmente dans toutes les régions de France de manière significative, avec différents niveaux d'intensité. Ainsi les plus fortes augmentations sont observées dans les régions de Bourgogne et Cognac (plus de 100% d'augmentation, indépendamment du scénario), suivies des régions du Languedoc, Bordeaux et Champagne, et une très faible augmentation dans la région de Côtes du Rhône. Ceci est lié en grande partie à l'augmentation de la capacité de mise en place des réserves.

*Tableau 4. Evolution des différentes composantes de la biomasse et des différents niveaux de stress abiotiques (hydrique et azoté), entre le scénario Contrôle (C) et les scénarios A2 et B2. *Valeur non significatif. (p >0.05).*

		Evolution de la production de biomasse (%)			Stress Hydrique		Stress Azoté	
		Biomasse Végétative	Biomasse des fruits	Mise en Réserves	Déb. - Flo.	Flo. - Rec	Déb. - Flo.	Flo. - Rec
Côtes du Rhône	B2 / C	3*	-25*	Sans Modif.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Diminution
	A2 / C	5*	-37*	Sans Modif.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Diminution
Languedoc	B2 / C	30*	-15*	Augment.	Légère Diminut.	Augment.	Diminution	Diminution
	A2 / C	36*	-23*	Augment.	Légère Diminut.	Augment.	Diminution	Diminution
Bordeaux	B2 / C	35*	3	Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Diminution
	A2 / C	44*	1	Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Diminution
Cognac	B2 / C	97*	26*	Forte Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Diminution
	A2 / C	108*	24*	Forte Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Diminution
Bourgogne	B2 / C	159*	60*	Forte Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Augment.
	A2 / C	247*	59*	Forte Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Augment.
Anjou	B2 / C	48*	14*	Augment.	Légère Diminut.	Forte Augment.	Diminution	Augment.
	A2 / C	71*	16*	Augment.	Légère Diminut.	Forte Augment.	Diminution	Augment.
Champagne	B2 / C	49*	66*	Forte Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Augment.
	A2 / C	65*	84*	Forte Augment.	Sans Modif.	Augment.	Diminution	Augment.

En revanche, les rendements suivent des tendances différentes selon les régions : ils vont être augmentés dans certaines régions de Bourgogne, de Champagne et de Cognac ; ils sont limités dans les régions de Bordeaux et Anjou ; et ils vont diminuer dans les régions du Languedoc et des Côtes du Rhône. Cette diminution des rendements est due au dépassement des seuils de production optimale (dépassement de l'optimum thermique journalier), à l'augmentation des stress hydriques en fin du cycle, au raccourcissement du cycle (surtout pour la période floraison-véraison), aux fortes températures (supérieures à 37°C), ainsi qu'à une forte concurrence entre la partie végétative et le grain du raisin (favorisée par le CO₂ et par la diminution du stress hydrique au début du cycle). Ces résultats sont très dépendants du type de sol. Ainsi, les sols à faible réserve utile montrent une accentuation des tendances montrées ici.

❖ *Conditions de maturation (période véraison-vendange)*

Nous avons observé une très forte modification des conditions climatiques de la période véraison-vendange. Le tableau 5 montre une forte augmentation de la température minimale moyenne pour cette période dans toutes les régions de France. Ceci est accompagné d'une forte augmentation du nombre de jours où l'on dépasse 37°C (température d'arrêt du stockage de carbone dans les baies).

Tableau 5 : Evolution de la température minimale de culture moyenne, du nombre de jours où l'on dépasse 37°C et de l'indice IQ_{climat}, entre les scénarios futurs B2 et A2 et le scénario Contrôle.

	Variation de Température minimale moyenne de culture		Variation du nombre de jours avec une température maximale de culture supérieure 37°C		IQ _{climat}	
	B2 / Contrôle	A2 / Contrôle	B2 / Contrôle	A2 / Contrôle	B2 / Contrôle	A2 / Contrôle
Côtes du Rhône	4.5	6.4	12	24	-6	-11
Languedoc	4.5	6.1	13	23	-7	-12
Bordeaux	4.2	5.8	4	8	-3	-5
Cognac	5.5	7.3	1	4	-2	-4
Bourgogne	6.2	8.7	1	7	-1	-4
Anjou	5.6	7.6	4	9	-3	-5
Champagne	5.8	8.1	1	3	-1	-3

A partir de ces résultats nous pouvons imaginer des situations de maturation complètement différentes de celles que l'on connaît actuellement. Ces résultats confirment les commentaires de certains auteurs qui considèrent que la typicité des vins de chaque région pourra être modifiée à cause de l'augmentation de la fréquence d'épisodes de fortes températures, mais aussi par l'augmentation des températures minimales et leur possible effet négatif sur la synthèse d'arômes et polyphénols (Schultz, 2000 ; Lebon, 2002 ; Jones *et al.*, 2005 a; Duchêne et Schneider, 2005), traduit dans notre cas par un déséquilibre entre le cycle de l'eau et du carbone dans la baie. D'autre part, les résultats obtenus avec l'indice IQ_{climat} montrent une forte modification des conditions de maturité dans toutes les régions, et elle est intensifiée dans les deux scénarios étudiés. La modification la plus importante des conditions générales est rencontrée dans les régions des Côtes du Rhône et du Languedoc.

Conclusion

L'étude d'impacts du changement climatique réalisée avec le modèle a permis d'effectuer des prévisions pour chacune des régions, en prenant en compte les interactions du système sol-climat-cépage-pratiques culturales. La possibilité de pouvoir tenir compte des différentes caractéristiques techniques et des cépages de chaque vignoble, a permis de décrire leur structure de façon la plus réaliste possible. Les principaux résultats de notre étude montrent un important bouleversement des conditions de production futures, qui se traduisent par des modifications importantes du développement, de la croissance et de la maturation de la vigne (avec des intensités différentes selon les régions). La structure et la capacité d'intégration de différentes techniques propres à la viticulture, a permis de réaliser un travail de prospection des stratégies d'adaptation des différents vignobles à partir de la modification des techniques culturales. Les résultats de ce travail seront présentés dans une prochaine communication.

Références

- Bindi M., Fibbi L., (2000) Modelling climate change impacts at the site scale on grapevine. In Climate Change, climatic variability and agriculture in Europe. An integrated assessment. Research report N° 21. Ed: Downing T.E., Harrison P.A et al., 117-134pp.
- Bindi M., Fibbi L. et al. (2001). Free Air CO₂ Enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO₂ concentrations. *European Journal of Agronomy*. 14(2): 145-155.
- Brisson N., Gaudillère J.P. et al. (2002). Use of the STICS crop model as a tool to inform vineyard zonages. Proceedings du 4ème Symposium International du zonage vitivinicole. France. CD edited OIV. 9pp.
- Duchêne E., Schneider C. (2005) Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agron. Sustain. Dev.* 25:93-99.
- García de Cortázar Atauri I., Brisson N. et al. (2005) Simulation of budbreak date for vine. The BRIN model. Some applications in climate change study. In: Proceedings of GESCO. Vol. 2. August 2005. Geisenheim, Germany. 485-490 pp.
- García de Cortázar Atauri I. (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie de Montpellier. 347pp
- IPCC (2001) Climate Change (2001) impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of the Working Group II to the third assessment report of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones G.V., White M.A. et al., (2005a) Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*. 73(3): 319-343.
- Jones G.V., Duchene E. et al., (2005b) Changes in European Winegrape Phenology and Relationships with Climate. Proceedings of 4th Gesco. Vol. I. Germany. 55-62pp.
- Lebon E. (2002) Changements climatiques: quelles conséquences prévisibles sur la viticulture? 6èmes Rencontres Rhodaniennes. Ed. Inst. Rhodanien. Orange, France. 31-36pp.
- Olesen J.E., Bindi M. (2002)). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agronomy*. 16: 239–262.
- Perarnaud V., Seguin B. et al. (2005). Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry to 21st Century Climate Change. *Climatic change*. 70: 319-340.
- Seguin B., Garcia de Cortázar Atauri I. (2004). Climate warning : consequences for viticulture and the notion of "terroirs" in Europe. *Acta Horticulturae*.
- Schultz H.R. (2000) Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of grape and wine research*. 6: 1-12.
- Schultz H.R., Lebon E. (2004). Modelling the effect of climate change on grapevine water relations. *Acta Horticulturae*. 689: 71-78.

EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DU MAÏS DANS LA DRÔME, FRANCE

IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON MAIZE CROP WATER PRODUCTIVITY IN THE DRÔME VALLEY, FRANCE

J.M. Gonzalez-Camacho*, J.C. Mailhol, F. Ruget

Colegio de Postgraduados, Montecillo, México 56230; Cemagref UMR G-EAU 361 JF Breton, BP 5095
34196 Montpellier cedex 5

*manuel.gonzalez@cemagref.fr

Introduction

Cette étude a été réalisée pour évaluer les impacts locaux d'un doublement du taux de CO₂ atmosphérique (660 ppm) sur la productivité de l'eau du maïs dans la vallée de la Drôme (SE France). En été les périodes d'étiage sont très sévères et les besoins en eau d'irrigation du maïs représentent environ 80 % de la demande en eau totale. Les anomalies mensuelles du climat ont été simulées par le modèle atmosphérique ARPEGE-CLIMAT (Gibelin et Déqué, 2001), lequel prévoit pour un doublement du taux de CO₂, une augmentation de la température de 4 °C et une diminution de la pluie de 30 % au mois de juillet. Des scénarios climatiques locaux pour les climats actuel (1xCO₂) et futur (2xCO₂) ont été générés avec le simulateur LARS-WG (Semenov et Barrow, 1997). Les effets du changement climatique sur le rendement et la productivité de l'eau du maïs ont été simulés par le modèle de culture STICS (Brisson et al. 1998). Différentes conditions de simulation ont été étudiées relatives au type de sol, dates de semis et seuils de stress hydrique pour les apports d'eau.

Matériels et méthodes

Données et modèles de simulation

Dans cette étude les données suivantes ont été utilisées : les données climatiques historiques (période 1960-2001) sont constituées des températures maximale (Tx) et minimale (Tn) de l'air en °C, de la pluie (P) en mm, du rayonnement global (Rg) en MJm⁻²·j⁻¹ et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) en mm, provenant de la station de Montélimar (Lat 44.35° N, Lon 4.44° E, et Alt 73 m) ; les anomalies mensuelles attendues de la température et de la pluie simulées par le modèle ARPEGE-CLIMAT pour le site ont les coordonnées Lat 44.43°N, Lon 4.78° E et Alt 371 m ; les scénarii climatiques journaliers de Tx, Tn, P, Rg et ETP sont générés avec le simulateur LARS-WG pour le climat actuel (1xCO₂) et future (2xCO₂) ; les caractéristiques agro-pédologiques et les itinéraires techniques de la culture du maïs sont caractéristiques de la vallée de la Drôme.

Simulation des effets climatiques du CO₂ avec le modèle de culture STICS

Les conditions de simulation de la culture du maïs grain dans STICS sont les suivantes : scénarii climatiques locaux actuel et futur générés avec LARS-WG ; date de semis le 20/04 ; trois ratios de stress hydrique RS = transpiration réelle (TR) / transpiration potentielle (TP) ; sol limono argileux ayant une réserve utile du sol (RU) de 129 mm et 100 cm de profondeur ; et un indice de récolte du maïs IR=0.5. Les simulations sur 30 ans ont été considérées indépendantes d'année en année, la teneur en eau initiale du sol nu étant fixée à la capacité au champ au premier jour de la simulation : jour julien 85, la date de fin de simulation étant fixée au jour julien 360.

Résultats

L'effet du changement climatique sur le rendement du maïs (tableau 1), pour un RS = 0.7, reste à peu près le même avec une augmentation de la dose d'arrosage de 14 %. En revanche, dans des conditions de stress hydrique, les pertes de rendement varient de 4 à 20 % et les accroissements de WUE varient de 13 à 5 % selon le niveau du seuil de stress. Pour le scénario 1xCO₂ une réduction du RS de 0.7 à 0.3 induit une perte de rendement de 26 % avec une diminution de WUE de 10 % et une réduction de la dose d'arrosage de 45 %. La variabilité des rendements passe de 4 % (apport d'eau quasi optimal) à 8 %. Par contre, dans le cas d'un scénario 2xCO₂, une diminution de RS de 0.7 à 0.3 induit une perte de rendement de 32 % et une diminution de WUE de 15 %. La variabilité du rendement passe de 5 à 10 %.

L'efficacité d'utilisation ou productivité de l'eau WUE est environ 13 % plus forte en atmosphère future qu'en atmosphère actuelle, sans tenir compte de la réduction de conductance. La prise en compte de ce facteur diminuera encore la transpiration, donc améliorera WUE.

Tableau 1 : Simulation par le modèle STICS de l'effet sur le rendement et la productivité de l'eau du maïs selon le seuil de stress hydrique pour le déclenchement des irrigations.

Culture maïs		Scénario 1xCO ₂					Scénario 2xCO ₂ avec effet direct et indirect du CO ₂				
RS	Simulations sur 30 ans	Dose (mm)	ETR (mm)	MS (t/ha)	Rdt (t/ha)	WUE kg/m ³	Dose (mm)	ETR (mm)	MS (t/ha)	Rdt (t/ha)	WUE kg/m ³
0.7	Moyenne	300	683	23.8	11.9	1.73	342	615	23.9	11.9	1.95
	CV (%)	19	3	4	4	5	12	3	5	5	6
0.5	Moyenne	240	637	21.3	10.7	1.67	274	563	20.6	10.3	1.83
	CV (%)	20	4	5	5	5	14	4	6	6	6
0.3	Moyenne	164	570	17.7	8.8	1.56	193	491	16.3	8.1	1.66
	CV (%)	27	5	8	8	6	16	5	10	10	9
En sec	Moyenne		435	11.5	5.7	1.30		338	9.3	4.6	1.36
	CV (%)		12	22	22	12		11	21	21	12

WUE est la productivité de l'eau du maïs (Rdt/ETR)

Cette efficacité pourrait être bien supérieure à 13 %, référence faite aux travaux expérimentaux faisant état d'un accroissement de 20 à 25% en conditions bien irriguées (Bethenod et al. 2001). En dépit des efforts consentis pour améliorer la résistance à la sécheresse des plantes, il est cependant peu probable que l'on puisse atteindre, dans des conditions de restriction d'eau, des rendements aussi élevés qu'en conditions irriguées (Tardieu, 2005), car le niveau de production d'une plante est fortement corrélé à celui de sa transpiration.

Conclusion

Le modèle ARPEGE-CLIMAT prévoit une augmentation de la température moyenne annuelle de 2.5 C° et de 4°C en juillet ; la pluie moyenne annuelle demeurant inchangée malgré une diminution de 30 % en juillet. L'utilisation du simulateur LARS-WG a permis de générer des scénarii climatiques locaux et de réduire le biais existant entre le scénario simulé par le modèle atmosphérique ARPEGE-CLIMAT et le climat historique.

L'effet indirect du changement climatique sous l'hypothèse 2xCO₂ induit une réduction de 21 % de la durée du cycle du maïs et une perte de rendement de 15 % ainsi qu'une augmentation de la dose d'arrosage de 14 %. L'effet direct d'un 2xCO₂ se traduit par une amélioration de l'efficacité de conversion de l'énergie incidente en biomasse qui compense l'effet de réduction de la durée du cycle. Sous l'hypothèse du maintien de l'indice de récolte IR = 0.5, le rendement en grain du maïs ne serait pas affecté par le changement climatique.

L'effet du stress hydrique sur le rendement peut être plus accentué pour un scénario 2xCO₂ que pour le scénario 1xCO₂.

Les effets d'un doublement du taux de CO₂ induisent dans des conditions d'apports quasi optimaux, une augmentation de la productivité de l'eau WUE d'environ 13 %. Cependant, dans des conditions de stress hydrique, ces accroissements diminuent de 13 à 5 % selon le seuil de stress.

Références

- Bethenod O. et al. (2001) Impact of atmospheric CO₂ concentration on water use efficiency of maize. *MAYDICA* 46 (2): 75-80.
- Brisson N et al. (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: 311-346.
- Gibelin AL, Déqué M. (2001) Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXIème Siècle. Météo France, Centre National de Recherches Météorologiques. Note de Travail 79. 64p.
- Semenov MA, Barrow EM. (1997) Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change* 35: 397-414.
- Tardieu F. (2005) Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress (Tolérance des plantes aux déficits hydriques : limites physiques et possibilités de progrès) *Comptes rendus. Géoscience* 337 : 57-67.

Remerciements

A l'UMR G-EAU du Cemagref de Montpellier pour les moyens mis à disposition pendant la réalisation de cette étude, dans le cadre du projet Gestion des Impacts du Changement Climatique (GICC) dans le bassin du Rhône.

STICS – ANALYSES EMPIRIQUES DE LA SENSIBILITÉ

STICS – EMPIRICAL SENSITIVITY STUDIES

A. Heuer *, M. Casper

Université Trier, Département de Géographie, Behringstr. 2, 54286 Trier, Allemagne

*heuer@uni-trier.de

Introduction

For various test sites empirical sensitivity studies have been carried out to gain a better knowledge of the essential requirements and the behavior of the model STICS (WinStics version 6.0). On the one hand the analyses concentrate on the effect of specific ranging values (one-factor-at-a-time sensitivity analysis, Lenhart et al., 2002) On the other hand the parameterized model is used to demonstrate and discuss the effects of various long-time simulations for specific situations.

Materials and methods

The sensitivity studies base on data collected at test sites in the southern and central part of the Upper Rhine Valley in the context of the project Monit ("Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur"; LUWB 2006). The test sites are distinguishable in soil conditions and cultivation methods, especially with regard to the amount and type of fertilizer, monocultures as well as crop rotations and the resulting variability of harvest and nitrate leaching.

By means of the data it was possible to run simulations to control specific parameters. Further more it was possible to observe the behavior of the model by various fictitious long-time simulations (20 years of simulation, only the last 17 years got interpreted). For 'Yield and nitrate leaching' the results of 17 years of simulation were aggregated and the mean value was taken. For 'Crop rotation' the long-time simulation was done four times, rotating the starting crop to cover climatic variability, afterwards averaged per culture.

Results

Stone bulk density and stone water holding capacity

Figure 1 shows several runs of simulation for a crop rotation (colza – winter wheat – winter barley). For the simulations only the type of stones (STICS: "typecailloux") in the soil horizons were modified, which means the modification of the specific stone bulk density [g/cm^3] and the stone water holding capacity [%weight]. As expected, the depth of the root system and the amount of dry matter rise with decreasing stone bulk densities and increasing stone water holding capacities.

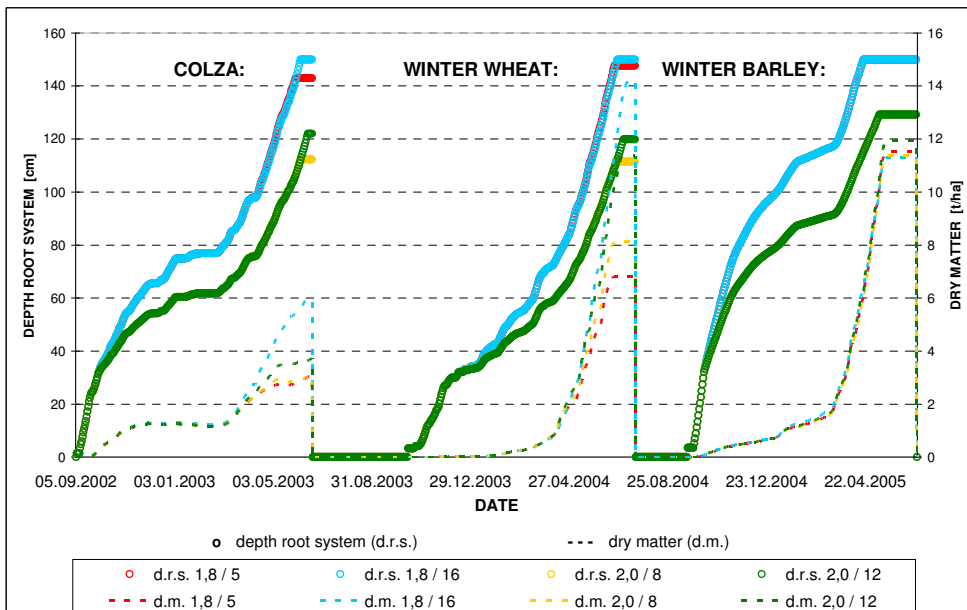


Figure 1 : Dry matter and depth of the root system at different stone bulk densities and stone water holding capacities.

Matière sèche aérienne totale et profondeur atteinte par le système racinaire pour différents types de cailloux (par l'humidité à la capacité au champ et la masse volumique).

Note that for a stone bulk density of 1,8 g/cm³ the depth of the root system behaves similarly, unattached of the stone water holding capacity ranging between 5% and 16%. So the stone bulk density is the more sensitive parameter regarding the depth of the root system.

Evaporation

Different approaches can be chosen to estimate the parameter of evaporation value at the end of the maximum evaporation stage (STICS: "q0" [mm]). According to N. Brisson & A. Perrier (1991) and J.T. Ritchie (1972), the values for a soil texture (contingent of clay +/- 25%) range from q0=9 (Ritchie) to q0=22 (Brisson & Perrier), which is a difference of nearly 250%.

Figure 2 demonstrates the results of this range regarding cumulated water at soil profile base and true daily evaporation rate: the higher q0, the less water reaches the soil base. In this example, the total difference of cumulated water at the soil profile rises up to +/- 100 mm. Respectively, the higher q0, the higher the daily evaporation rate.



Figure 2: Effect of using different approaches to estimate evaporation: regarding cumulated water at soil profile base and true daily evaporation rate.

Effets de différentes estimations de l'évaporation sur l'évaporation réelle journalière et le cumul d'eau drainée à la base du profil de sol.

Yield and Nitrate leaching (long-time simulation)

Figure 3 demonstrates the results of various long-time simulations (17 years, monoculture grain maize). The test sites all belong to one climatic region in the Upper Rhine Valley, but they differ in soil type (I, II = luvisol; III = gley soil; VI, V = alluvial soil). For every soil type three long-time simulations were done, each time reducing the total amount of applied fertiliser (a = 160 kgN/ha; b = 144 kgN/ha; c = 115 kgN/ha).

The reduction of fertilizer stands for the reduction of yield as well as for nitrate-leaching. This affects all simulated soils, even though there are broad differences in the total amount of yield respectively nitrate-leaching. Further more, every soil type reacts different (more or less sensitive) to the climatic variability within the simulation period of 17 years. This does not only affect the range of yield but also of nitrate-leaching.

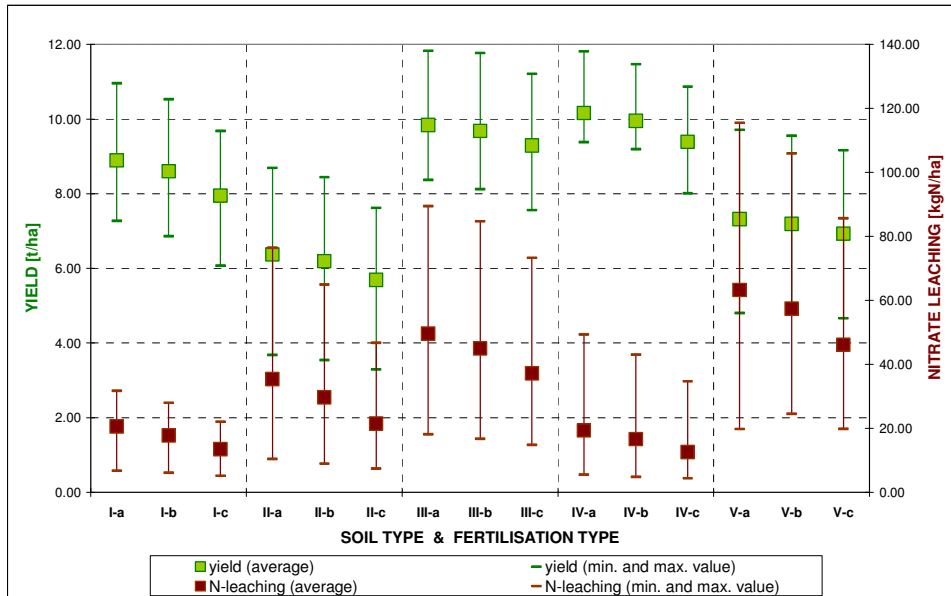


Figure 3 : Variability of yield and nitrate-leaching for grain maize, depending on different soil types and amounts of fertilizer.

Variabilités du rendement et du lessivage du nitrate en monoculture de maïs grain en fonction du type du sol et de la quantité d'engrais.

Crop rotation (long-time simulation)

Figure 4 also presents a long-time simulation but this time it focuses on different types of crop rotation (3:1 = winter wheat - grain maize - grain maize - grain maize; 2:2 = winter wheat - grain maize - winter wheat - grain maize, no catch crop) compared to monoculture (grain maize, no catch crop). All of them within one climatic region and with the same soil characteristics, again reducing the total amount of fertilizer (a,b,c).

As we see, the more winter wheat substitutes grain maize, the higher the yield of maize and wheat can be expected. A positive effect from the farmer's point of view.

Interesting is the fact, that the more winter wheat substitutes grain maize, the higher also the rates of nitrate leaching. A negative effect regarding groundwater quality.

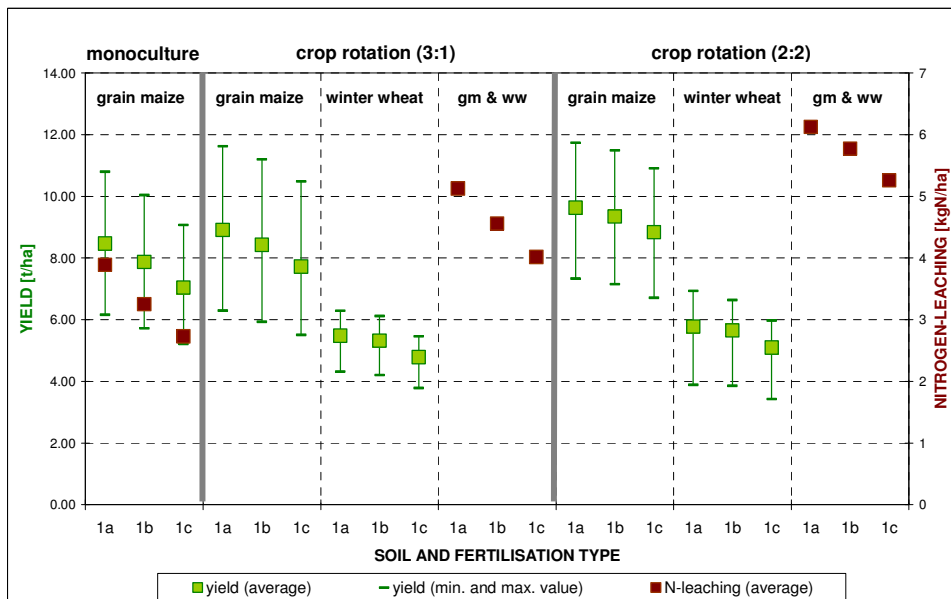


Figure 4 : Yield and nitrate leaching for different types of cultivation (monoculture versus crop rotations). – Rendements et lessivages du nitrate en monoculture de maïs et en rotation de cultures différentes.

Humification (long-time simulation)

The process of humification got studied for grain maize (monoculture). In-between the cultivation of the main crop there is bare soil. Fertilizer was applied to both, main crop (urea) and bare soil (ammonium nitrate, cowshed manure), further more the residues of the main crop (straw) remained on the field.

As the results of the standard simulation period of 17 years have been unsatisfactory, an extra long period of first runnings (20 years) was added, so the whole simulation period was 37 years.

Thus, in the model the process of humification needs a long period of initialisation to achieve realistic results. After an extreme N-demand of the residues (years 13-17), years of extreme N-delivery of residues follow (years 19-21). Only now a realistic process of humification seems to be modeled. A plausible reason for this deflection is not found yet. Remarkable that the level of the active nitrogen reservoir arises from 1700 kgN/ha to more than 3200 kgN/ha.

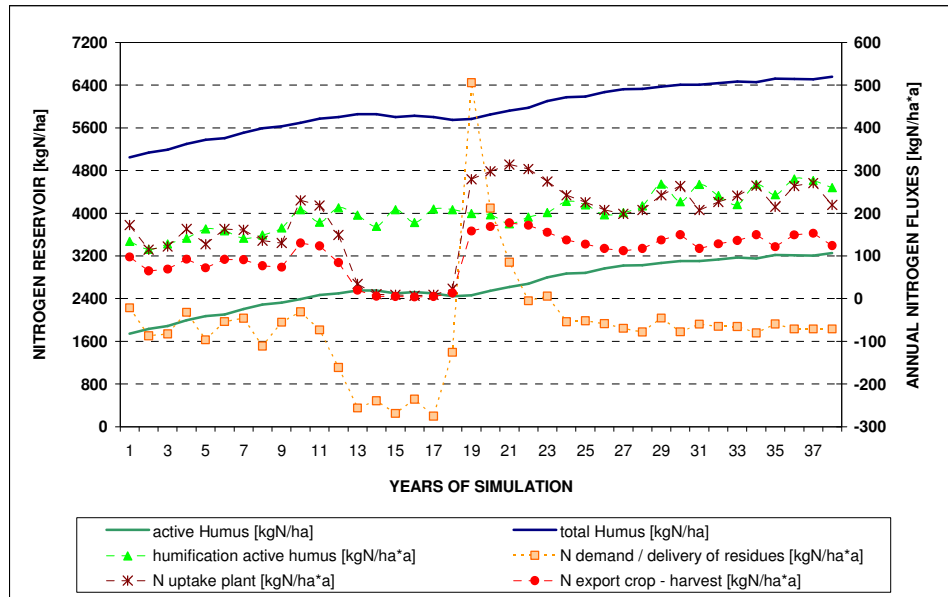


Figure 5: The process of humification: broad fore-runnings are necessary to model the process of humification correctly.

Une période longue d'initialisation du modèle est nécessaire pour pouvoir bien simuler le processus d'humification.

Conclusions

Using the model STICS requires a broad sensitivity analysis to find the essential and the most sensitive parameters of the complex model. Besides the “one-factor-at-a-time” analysis the next step should be a Monte Carlo analysis to detect higher order effects such as compensation and synergism of special parameters.

References

- Brisson N., Perrier A. (1991) A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. In: *Water Resources Research* 27: 719-727.
- Lenhart T., Eckhardt K., Fohrer, N., Frede, H.-G. (2002) Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Phys. Chem. Earth*, 28: 1301-1309.
- LUBW (Ed.) (2006) Prognosen zur Entwicklung der Nitratbelastung - INTERREG III A-Projekt MoNit "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben" (final report), Karlsruhe.
- Ritchie, J.T. (1972) Model for predicting evaporation from a crop with incomplete cover. In: *Water Resources Research*, 8, 1204-1213.

ADAPTATION DU MODELE STICS POUR MODELISER LE FONCTIONNEMENT DES PRAIRIES MEDITERRANEENNES PENDANT LES SECHERESSES ESTIVALES

STICS CROP MODEL ADAPTATION TO MODELISE MEDITERRANEAN MEADOW FUNCTIONING DURING SUMMER DROUGHTS

S. Satger¹, F. Ruget², N. Brisson³, F. Volaire¹, F. Lelièvre¹

¹ INRA, UMR SYSTEM, 2 place Viala, 34060 Montpellier; satger@supagro.inra.fr

² INRA, Unité CSE, Site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9

³ INRA, Agroclim Site Agroparc, F-84914 Avignon

1. La production fourragère face à la sécheresse et au changement climatique

Le changement climatique se traduit en Europe par la remontée en latitude de l'influence méditerranéenne, avec augmentation de fréquence et d'intensité des sécheresses. Dans les régions périméditerranéennes françaises, trois étés récents (2003, 2005 et 2006) ont été de cette nature. Les grandes difficultés des éleveurs dans ces situations montrent que le risque sécheresse est mal intégré par la plupart des systèmes fourragers pratiqués en France. La sécurisation passera par la diminution des charges animales par ha fourrager, l'accroissement des stocks de réserve (ou les possibilités d'achat à faible coût), et l'utilisation de plantes fourragères résistantes à la sécheresse.

Pour les plantes fourragères pluriannuelles (ray-grass pérenne, dactyle, fétuque élevée, luzerne, trèfle, ...) constituant les prairies permanentes et temporaires, la résistance à la sécheresse n'a pas le même sens selon les zones climatiques. En climat tempéré, c'est l'aptitude à retarder l'arrêt de croissance et la sénescence foliaire pendant les périodes modérément sèches et chaudes de l'été pour offrir un gain de pâture, et la capacité à éviter toute mortalité. Deux caractères des plantes sont déterminants : un système racinaire profond et le maintien d'un bon potentiel de croissance foliaire aux températures élevées (fétuque élevée, dactyle, luzerne). Cette vision peut être étendue aux climats méditerranéens subhumides (régions françaises, Corse comprise) mais avec deux éléments différents : (i) à cause du déficit climatique très important de mai à septembre, la croissance s'arrête pendant 50 à 120 jours selon les années, le lieu et la profondeur de sol, avec peu d'écart entre espèces et variétés ; (ii) ce déficit entraîne un pourcentage de mortalité très variable selon les variétés, plus fort pour celles originaires des milieux tempérés. Pour la suite, on restera dans cette gamme de milieux et de matériel végétal actif en été.

Notons que plus bas en latitude, vers le semi-aride, l'arrêt de croissance estival dure 4 à 5 mois et les seuls critères de résistance sont alors le taux de survie et la qualité (densité, vitesse) de la repousse d'automne. Les plantes les plus résistantes sont des types méditerranéens ayant un potentiel de croissance faible ou nul en été et/ou un certain niveau de tolérance à la déshydratation des méristèmes (1).

Chez des espèces fourragères majeures comme le dactyle et la fétuque élevée, la variabilité intraspécifique de comportement est telle qu'on trouve des types adaptés dans ces différents milieux ; il sera donc difficile de conserver la notion de « prairie moyenne ».

2. Intérêt et limites actuelles de STICS-prairie en conditions très sèches

Un modèle prévisionnel de la croissance des prairies est un outil essentiel aussi bien pour simuler la production fourragère en temps réel et gérer les crises à l'échelle d'un pays (système ISOP), que pour modéliser les effets de scénarios climatiques possibles sur la pérennité des couverts et leur production. Le modèle STICS-prairie tempérée (STICS-PT) a été choisi (2). Actuellement, il est valide pour le fonctionnement d'une prairie standard moyenne à base de graminées pérennes, en climat tempéré. Pour être valable à une plus large échelle d'espace et de temps, notamment pour simuler les effets du changement climatique, le modèle doit décrire les effets de conditions estivales très sèches sur la croissance et les évolutions de peuplement. Cela correspond à la période de juin à septembre en milieu méditerranéen, avec ses particularités : évapotranspiration potentielle et températures très élevées ; sécheresses extrêmes ; degré de sénescence et de mortalité des plantes pouvant être élevés ou totaux ; forte différenciation des effets entre types variétaux. C'est l'objectif du travail présenté ici.

3. Phénologie à modéliser et premiers tests

Pour une prairie de graminées en milieu méditerranéen, après la fauche du cycle reproducteur entre mi-avril et mi-mai, il y a un à deux cycles de repousses végétatives feuillées dont la croissance peut être arrêtée par la sécheresse entre début mai et début juillet selon les années et les régions. Le déroulé des événements et des questions de modélisation sont les suivants (3,4) :

A. Entrée en sécheresse (arrêt de la croissance et du développement sous l'effet du stress croissant) : en fin de printemps, l'élongation foliaire, l'apparition de nouvelles feuilles et l'émission d'ébauches foliaires s'arrêtent progressivement et simultanément sous l'effet du stress croissant. L'élongation des jeunes feuilles est figée et ne reprendra qu'au retour des pluies d'automne si elles ont survécu. La photosynthèse diminue avec retard sur l'élongation, le différentiel provoquant une forte accumulation de sucres de réserve dans les apex et les gaines foliaires. A ce stade, la biomasse de réserve R_0 est maximale, environ 30 à 50 g/m² dans la couche basse de végétation (0-5 cm). Elle vient s'ajouter à la biomasse structurelle résiduelle après les fauches ($BS_0=60$ à 120 g/m²). Ces deux masses BS_0 et R_0 sont réparties dans un nombre de talles initialement optimum (N_0 , environ 3000 talles/m² chez le dactyle). STICS-PT simule assez bien cette phase (Ruget et Brisson dans ce document).

B. Sénescence foliaire et perte progressive de LAI : après l'arrêt de croissance et de développement, la durée de vie des feuilles n'est plus affecté par l'auto-ombrage. La sénescence foliaire et la baisse du LAI ne se poursuivent alors que sous l'effet du stress hydrique croissant, en commençant par les plus vieilles feuilles. Cette progression dans un couvert bloqué en développement est 3 à 5 fois plus lente que celle créée par l'auto-ombrage dans le même couvert irrigué en pleine croissance. Une feuille dont l'élongation est figée par le stress hydrique en juin reprendra son élongation au retour des pluies d'automne 2 à 4 mois plus tard, sa « durée de vie » pouvant dépasser 2000 degrés-jours contre environ 400 dans un couvert en croissance. Les fonctions reliant le stress hydrique au développement et à la sénescence foliaire sont donc à reconsidérer dans ces conditions. Par ailleurs, tous les résultats bibliographiques montrent que la transpiration se maintient à un certain niveau quand le LAI tend vers zéro, du fait que les gaines foliaires et les tissus enclos restent hydratés et transpirent. Le modèle doit aussi être adapté sur ce point.

C. Dynamique de peuplement (mortalité des talles) : dans le contexte méditerranéen, il est obligatoire d'introduire des formalismes de variation du peuplement de plantes ou de talles. La mortalité journalière doit être calculée (m_j = nombre de talles mortes/m² le jour j), ainsi que sa traduction en évolution de la densité de peuplement survivant (N_j , nombre de plantes ou de talles/m² vivantes au jour j , avec $N_j = N_{j-1} - m_j$). Cela suppose d'abandonner l'idée de plante moyenne et de valeurs par m² (couches) pour introduire un paramètre de variabilité au sein du peuplement de talles, qui va ordonner la mortalité au cours du temps. La chute de peuplement s'accompagne d'une baisse dans la même proportion de la masse de réserve (R_j) et de biomasse structurelle (BS_j) (3).

D. Reprise de la croissance, du développement et dynamique de tallage, après la réhydratation : le LAI résiduel recommence à fonctionner après réhydratation. Dans un délai de 100 degrés-jours (6 à 7 j en septembre), les réserves carbonées résiduelles R_j sont aussi mobilisées pour faire de la surface foliaire. L'ensemble des paramètres ultérieurs de peuplement, de vitesse de croissance et de production, seront affectés d'un coefficient de réduction compris entre 0 et 1, exprimé en fonction du pourcentage de talles ayant survécu à l'été. Ceci définit pour l'année 2 des valeurs maximales dépendantes du degré de dégradation du peuplement en fin d'été.

4. Moyens mis en œuvre pour le paramétrage et la validation

L'adaptation des formalismes tel que décrit ci-dessus est en cours dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe Enherbement de l'UMR System Montpellier et l'équipe STICS CSE-Agroclim INRA Avignon. Il concerne pour l'instant les graminées fourragères (fétuque et dactyle). Un essai destiné spécifiquement au paramétrage des nouveaux formalismes est en place à Montpellier. Il inclut des cultivars contrastés pour la résistance à la sécheresse de fétuque (Flecha Nil et Soni) et de dactyle (Porto, Kasbah et Medly). En plus des mesures classiques nécessaires à la validation de STICS dans sa version actuelle, des mesures d'évolution de la densité de talles et de la quantité de réserves (teneur en sucres) sont réalisées. A la reprise d'automne, les efforts porteront en particulier sur la remise en place du peuplement (taux de survie, tallage et reconstitution du peuplement).

A terme nous prévoyons un paramétrage par grands types variétaux. On utilise un réseau de parcelles expérimentales testant une large gamme de cultivars mis en place dans le cadre d'un projet euro-méditerranéen (PERMED, 'Improvement of native perennial forage plants for sustainability of Mediterranean farming systems'). Ce programme a pour objectifs d'accélérer la sélection de variétés herbacées pérennes adaptées à différents niveaux d'aridité, et de proposer des solutions prairiales pérennes alternatives aux cultures annuelles (céréales). Il associe dix équipes de recherche de sept pays du pourtour méditerranéen (Algérie, Espagne, France, Italie, Maroc, Portugal et Tunisie). La validation des formalismes sera faite sur des sites situés au Portugal, en Algérie et en Sardaigne.

Références

- (1) Volaire F., Norton M., Lelièvre F. (2006) What is summer dormancy in temperate perennial grasses ?. Proc. Eucarpia Meeting, Fac. of Agric., Perugia, Italy, 3-7 sept.
- (2) Ruget F., Brisson N. (2007) Modéliser l'impact de la sécheresse sur la production fourragère par le modèle STICS. CR journées AFPPF 27-28 mars 2007, à paraître dans la revue *Fourrages*.
- (3) Volaire F., Thomas H. & Lelièvre F. (1998) Survival and recovery of perennial forage grasses under prolonged Mediterranean drought I. Growth, death, water relations and solute content in herbage and stubble. *New Phytologist*, 140: 439-449.
- (4) Volaire F., Lelièvre F. (2001) Drought survival in *Dactylis glomerata* and *Festuca arundinacea* under similar rooting conditions in tubes. *Plant and Soil*, 229: 225-234.

THEME 4

COUPLAGE DE STICS ET D'UN MODELE DE TRANSFERT RADIATIF (SAIL-2M) COUPLING STICS TO THE SAIL-2M RADIATIVE TRANSFER MODEL

M. Weiss*, F. Baret, M. Launay, D. Ripoche, N. Brisson, F. Ruget

*NOVELTIS, 2, avenue de l'Europe, Parc technologique du canal, F-31520 Ramonville Saint-Agne

*marie.weiss@avignon.inra.fr

Introduction

Cette étude, financée par le Centre National des Etudes Spatiales (CNES), vise à proposer un outil de simulation de l'évolution temporelle de la réflectance d'une culture. Elle consiste donc à coupler le modèle de fonctionnement de culture STICS au modèle de transfert radiatif SAIL-2M pour deux espèces : le blé et le maïs. Le couplage a été validé sur deux jeux de données proposant à la fois des mesures au sol pour alimenter le modèle STICS, et des données satellitaires à haute résolution spatiale.

Matériels et méthodes

Les données expérimentales

Les données expérimentales utilisées pour valider le couplage des deux modèles sont issues de deux campagnes de mesures :

- *la campagne ADAM (2000-2001)* : L'expérimentation a été réalisée dans la plaine du Danube en Roumanie, sur le site de Fundulea. Un vaste dispositif expérimental a été mis en place pendant la campagne agricole 2000-2001 : acquisition massive d'images satellite optiques et radar, campagne de mesures de terrain très détaillées, caractérisation fine du milieu, itinéraire technique,.... 43 ESUs (Elementary Sampling Unit) ont été sélectionnées sur des parcelles de blé et suivies durant un cycle complet de la végétation. Ces ESUs qui représentent toutes une surface d'environ 1 ha (5*5 pixels SPOT) ont été sélectionnées de manière à représenter des zones de végétation homogènes.
- *la campagne CHRIS (2002)* a été réalisée au sud d'Avignon, près de Saint-Etienne du Grès entre les Alpilles (Sud-Est du site) et la Montagnette (Nord-Ouest) sur 8 parcelles de maïs, sélectionnées en fonction de leur taille et des variétés semées. Les parcelles ont été suivies régulièrement tout au long du cycle de végétation, de la même manière que pour ADAM.

Le modèle SAIL-2M

SAIL (Verhoef, 1984; Verhoef, 1985) est un modèle de transfert radiatif unidimensionnel utilisé dans une multitude d'applications. Le modèle appartient à la catégorie des modèles "turbides", pour laquelle le couvert végétal est représenté par une couche horizontale constituée d'éléments diffusants et absorbants distribués aléatoirement en son sein (figure 1). La version SAIL-2M (Weiss et al., 2001) est une version multicouches et multiéléments du modèle SAIL. Il permet de simuler la réflectance d'un couvert végétal en tenant compte de la présence de plusieurs organes végétaux (feuilles, épis et tiges) possédant des propriétés optiques différentes (donc caractérisant des "états biologiques" différents comme feuille verte, jaune ou sénescence). Pour cela, il représente le couvert végétal par la superposition de plusieurs couches de végétation dont chacune est constituée de un ou plusieurs types de ces éléments. Outre les propriétés optiques des organes, le modèle nécessite la description de l'architecture du couvert au travers de l'indice foliaire et de l'angle moyen d'inclinaison de chacun des organes. Enfin, il est également nécessaire de caractériser les propriétés optiques du sol, ainsi que les conditions d'acquisition de l'image satellite, c'est-à-dire la géométrie d'observation (position du satellite et du soleil) et les bandes spectrales du capteur.

Les propriétés optiques des différents organes sont simulées grâce au modèle PROSPECT (Jacquemoud and Baret, 1990) par le biais de 5 paramètres biochimiques que sont les concentrations en chlorophylles a et b (C_{chloro} en $\mu\text{g cm}^{-2}$), en matière sèche (C_{ms} en g cm^{-1}), en eau (C_{eau} en cm^{-1}) et un indice de structure du mésophylle (N sans dimension).

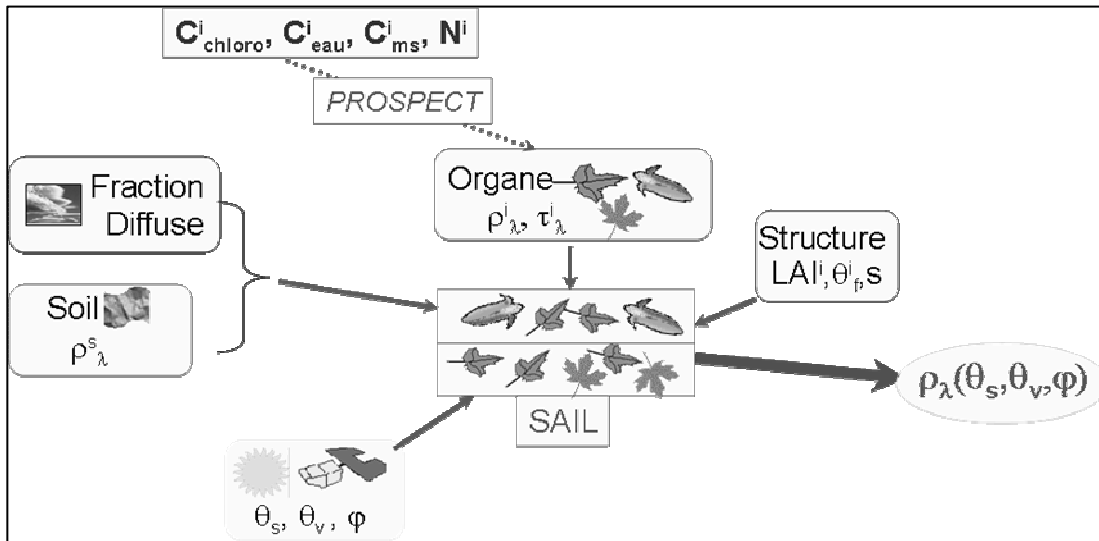


Figure 1 : Fonctionnement du modèle SAIL-2M (Entrées, Sorties)

Couplage de STICS et SAIL-2M pour le blé

L'ensemble de ce travail se base sur l'étude de (Weiss et al., 2001). Une adaptation importante a été réalisée pour bénéficier des nouvelles possibilités d'interfaçage offertes par STICS6.2 par rapport à la version STICS 4 .0 précédemment utilisée.

Les différentes couches définies pour SAIL-2M dans ce couplage sont les suivantes :

1. une couche représentant le sol et caractérisée par un spectre de réflectance
2. une couche sénescente comprenant des feuilles jaunes et des tiges sénescents. Les feuilles sénescents sont négligées car elles représentent une très faible fraction de la plante et leurs propriétés optiques sont proches de celles du sol
3. une couche verte composée de tiges vertes et de feuilles vertes
4. une couche d'épis composée d'épis verts et d'épis sénescents

Les différentes couches peuvent exister ou non en fonction du stade de la végétation. Certaines variables d'entrée de SAIL-2M sont renseignées par les sorties de STICS :

- les indices de surface d'organe (verts, jaunes, sénescents) sont estimés à partir des LAI des feuilles vertes et sénescents, ainsi que des facteurs de répartition de la biomasse issus de STICS. Afin de relier ces variables, des relations empiriques entre surface et biomasse des tiges et épis (verts ou sénescents) ont été ajustées sur des jeux de données indépendants provenant de 3 campagnes de mesures (figure 2).
- le contenu en matière sèche de chaque organe est estimé à partir des facteurs de répartition de la biomasse et de la biomasse totale issus de STICS.
- des relations empiriques, calculées sur les données d'ADAM, ont permis de relier le contenu en eau des différents organes à l'unité relative de développement (Chauki et al., 2003)

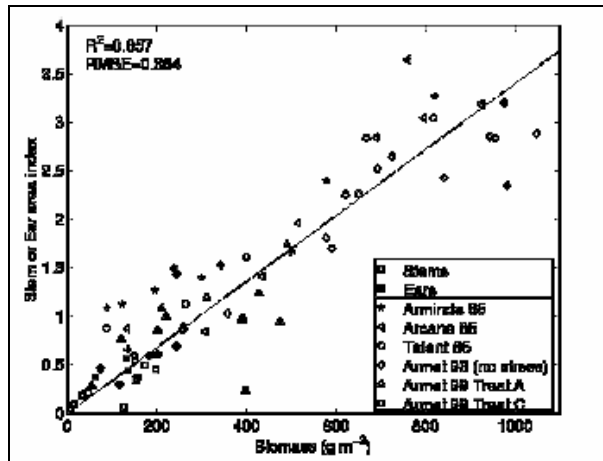


Figure 2 : Exemple de relation empirique entre la surface des organes et leur biomasse.

Couplage de STICS et SAIL-2M pour le maïs

Nous avons procédé ici de la même manière que pour le blé en considérant différentes couches de végétation. Les fleurs et les épis ne sont pas pris en compte car la fleur femelle et l'épi ne sont pas localisés sur le dessus du couvert végétal ce qui implique une influence de second ordre sur la radiométrie. Par ailleurs, la fleur mâle représentant une faible surface, le couplage ne tient compte que des feuilles et des tiges. De plus, durant son évolution, les feuilles du plant de maïs jaunissent à partir du bas, tant que le stade foliaire maximal n'est pas atteint, puis à partir du haut. En effet, la plante concentre toute « son énergie » à la production de l'épi et donc privilégie les feuilles qui se trouvent autour de l'épi. Nous avons décidé de considérer autant de couches de végétation que la plante contient de feuilles pour pouvoir utiliser facilement un modèle de description du contenu en chlorophylle d'une plante de maïs en fonction du numéro d'ordre de la feuille. Le nombre de feuilles est déterminé chaque jour par le modèle STICS. Seules les feuilles et tiges vertes ainsi que des feuilles et tiges brunes sont considérées dans chaque couche. Les caractéristiques de ces organes par couche sont renseignées à partir des sorties de STICS :

- Les indices d'organes : la séparation entre organes verts et organes sénescents se fait à partir du rapport entre les la matière sèche des feuilles qui tombent et la matière sèche des feuilles jaunes. Les indices de surface de tiges sont déterminés à partir des travaux de España (1997) et Lopez-Lozano *et al.* (2006)
- Le contenu en matière sèche de chaque organe : il est estimé à partir des facteurs de répartition de la biomasse et de la biomasse totale.
- Le contenu en eau des organes préconisés dans le fichier plante de STICS a été utilisé comme entrée de SAIL-2M. En effet, nous ne disposons pas de bases de données expérimentales sur le maïs pour établir le même type de relations que pour le blé.

Deux couches supplémentaires sont également considérées, l'une représentant le sol, caractérisé par un spectre de surface, l'autre représentant les conditions aux limites de l'atmosphère au-dessus du couvert végétal, caractérisées par la fraction de rayonnement diffus et la position du soleil.

Validation du couplage de STICS et SAIL-2M

La figure 3 présente la comparaison entre réflectances mesurées et les réflectances simulées par le modèle couplé pour l'ensemble des dates et des parcelles suivies pour le blé et pour le maïs. Les résultats montrent une estimation plutôt satisfaisante du modèle couplé, sans biais, avec une erreur au sens des moindres carrés (RMSE) inférieure à 0.06. Ces résultats paraissent acceptables en comparaison de toutes les hypothèses faites pour les simulations STICS (par exemple, irrigation automatique pour le maïs) ou pour SAIL-2M (contenu en chlorophylle des organes constant au cours du temps) On peut noter que, pour le blé, on pourrait certainement améliorer la simulation de la sénescence, puisque pour les dates correspondant à cette période, la réflectance, quelle que soit la bande, est systématiquement sous-estimée. De même, le modèle couplé a tendance à sous-estimer la réflectance pour les dates de début de cycle (résultats non montrés). Ceci provient certainement du fait que le sol était supposé posséder des propriétés optiques constantes dans le temps. Or, dans la réalité, ces propriétés optiques sont modifiées lorsque le sol est à différents états d'humidité (sol plus ou moins brillant).

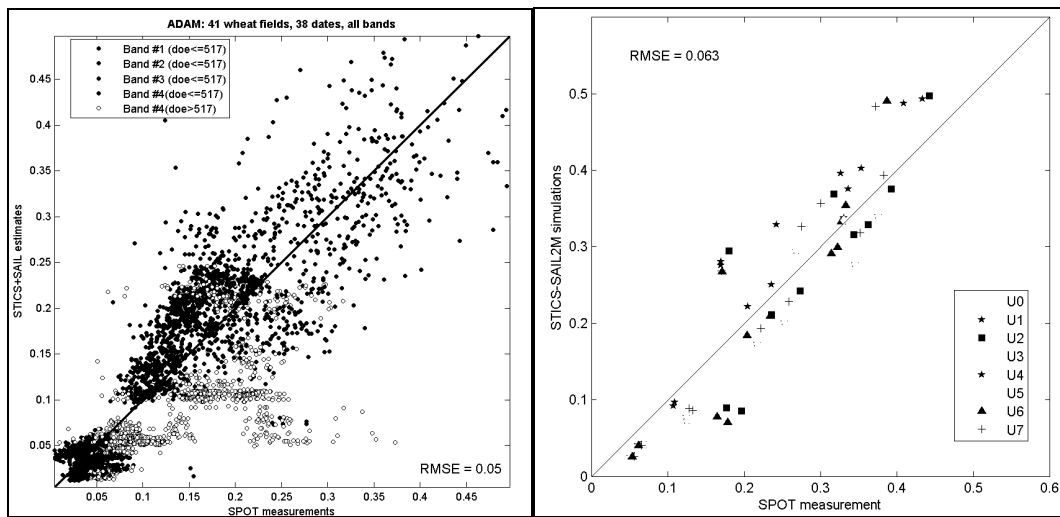


Figure 3 : Comparaison des réflectances mesurées (images SPOT) et des réflectances simulées par le modèle couplé STICS/SAIL-2M pour le blé (gauche) et pour le maïs (droite).

Conclusion

Le couplage de STICS avec un modèle de transfert radiatif simule la réflectance avec une précision acceptable. Des améliorations pouvant avoir un impact important sur le modèle couplé (et les applications qui s'en suivent) seraient nécessaires, en particulier pour la description de la sénescence des feuilles. Toutefois, le facteur limitant le plus important provient certainement de notre incapacité actuelle à bien décrire les relations entre chlorophylle et azote de la plante, aussi bien pour le maïs que pour le blé. En effet, il est établi que le contenu en azote des feuilles est très corrélé à leur contenu en chlorophylle. Hors, à ce jour, la variable qui décrit le bilan azoté de la plante dans STICS et dans la plupart des modèles de fonctionnement est le contenu total de la plante et non celui des feuilles. La répartition de l'azote entre les organes de la plante est méconnue et de ce fait, nous n'avons pas pu arriver à un couplage sur la chlorophylle. Ce couplage serait fort intéressant dans le cadre d'applications comme le pilotage de la fertilisation azotée par télédétection.

Références

- Chauki H., Brisson N. and Prévot L. (2003) Relationships between the dynamics of the durum wheat water content and its phasic development in a Mediterranean climate, for remote sensing purposes. *Agronomie*, 23: 537-544.
- España M.L. (1997) Simulation de la variation temporelle, directionnelle et spectrale de la réflectance des cultures de maïs à partir d'un modèle dynamique de la structure 3D du couvert, Université de Marne-la-Vallée, France.
- Jacquemoud S. and Baret F. (1990) PROSPECT : A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.*, 34: 75-91.
- Lopez-Lozano R., Baret F., Chelle M., Rochdi N. and España M. (2006) Sensitivity of gap fraction to maize architectural characteristics based on 4D model simulations. *Remote Sens. Environ.*, submitted.
- Verhoef W., (1984) Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling : the SAIL Model. *Remote Sens. Environ.*, 16: 125-141.
- Verhoef W. (1985) Earth observation modeling based on layer scattering matrices. *Remote Sens. Environ.*, 17: 165-178.
- Weiss M. et al. (2001) Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. *Agric. For. Meteorol.*, 108: 113-128.

Remerciements

Nous remercions le CNES pour le financement de cette étude. Nous tenons également à remercier les personnes qui ont participé aux campagnes de mesures du projet ADAM (Assimilation de Données par Agro Modélisation, <http://kalideos.cnes.fr/index.php?id=accueil-adam>), ainsi que du projet CHRIS.

ADAPTATION A COURT ET A LONG TERME DE L'AGRICULTURE AU RISQUE DE SECHERESSE : UNE APPROCHE PAR COUPLAGE DE MODÈLES BIOPHYSIQUES ET ÉCONOMIQUES

SHORT AND LONG TERM ADAPTATION OF AGRICULTURE TO DROUGHT RISK: COUPLING ECONOMICS AND BIOPHYSICAL MODELS

Arnaud Reynaud

LERNA-INRA, Université Toulouse 1, Manufacture des Tabacs 21, Allée de Brienne F-31000 TOULOUSE
areynaud@toulouse.inra.fr

Introduction

Au cours de l'expertise scientifique collective sur les relations entre sécheresse et agriculture, pilotée par l'Inra en 2006, les chercheurs ont pointé du doigt l'absence de données quantitatives fiables sur l'impact économique d'une sécheresse en France. En réponse, nous proposons un couplage original entre le modèle agronomique « STICs » développé par l'Inra et un modèle de calcul économique en univers incertain qui a pour but d'estimer le coût des épisodes de sécheresse pour un agriculteur représentatif de la région Midi-Pyrénées et de déterminer si ses décisions de court ou de long terme permettent d'atténuer de manière significative ce coût.

On utilise le modèle biophysique de manière à simuler le processus de croissance des cultures pour différents itinéraires techniques, notamment différents vecteurs d'apports en eau tout au long de la campagne d'irrigation. Les sorties du modèle agronomique servent alors d'entrée à un modèle économique qui décrit le comportement de maximisation de la fonction objectif de l'agriculteur en univers incertain. L'emploi d'un simulateur agronomique permet d'acquérir des données fines sur les relations entre calendriers d'irrigation et niveau physique de la production. Pour étudier l'impact de la sécheresse sur le comportement et la fonction objectif de l'agriculteur, il paraît en effet peu approprié de se limiter aux données généralement utilisées par les économistes agricoles (volume de production et inputs agrégés), qui ne renseignent que sur la relation entre rendement et volume d'eau total mais pas sur les relations entre l'output et la répartition intra-annuelle de ce volume. Un simulateur agronomique constitue également un moyen peu coûteux d'acquérir de l'information (les simulations sont un substitut à des expérimentations à grandes échelles) qui permet de générer des données qui correspondent à différentes conditions météorologiques, toutes choses égales par ailleurs. Il est alors possible d'isoler la variabilité des rendements due au climat et de mettre en lumière le rôle joué par l'irrigation.

Ce travail de modélisation est complexe de par la dynamique en jeu entre les données climatiques, les productions agricoles et les décisions des agriculteurs. Ainsi, le modèle prend en compte l'histoire climatique de 1972 à 2005, dont cinq années de sécheresse, et inclut trois systèmes de culture qui peuvent être utilisés par l'agriculteur représentatif : une monoculture de maïs (très consommatrice en eau) ; une rotation entre blé dur et sorgho (moyennement consommatrice en eau) ou une rotation entre blé dur et tournesol (très peu consommatrice en eau). Pour limiter l'impact économique d'une sécheresse, l'agriculteur ne peut modifier à court terme, c'est-à-dire à l'échelle intra-annuelle où les assolements sont déjà déterminés, que des tactiques d'irrigation (combinaisons possibles entre des choix de dates d'irrigation et des quantités d'eau à apporter) associée à un système de culture. A long terme, la réponse de l'agriculteur consiste, en outre, à déterminer quelle proportion de sa surface agricole utile doit être allouée à chacun des trois systèmes de culture de manière à maximiser sa fonction objectif.

Les apports de cet article se situent à deux niveaux. D'abord, en terme de méthodologie nous montrons comment une approche par couplage de modèles économiques et biophysiques permet d'analyser l'impact du risque climatique sur les décisions des agriculteurs en distinguant les décisions intra-annuelles de court terme (choix de stratégie d'irrigation) et celles inter-annuelles de long terme (choix d'assolements). Ensuite, nous fournissons un certain nombre d'éléments (mesure de primes de risque, valeur pour l'agriculteur de l'information relative au risque de sécheresses) susceptibles d'aider à la prise de décisions publiques concernant notamment la mise en place de mécanismes d'alerte sécheresse précoces.

Matériels et méthodes

Le modèle économique de décision en univers incertain

On considère un agriculteur représentatif d'une zone géographique (Midi-Pyrénées) et d'un contexte pédo-climatique donnés faisant face à un aléa qui représente les conditions climatiques. Pour gérer au mieux les réalisations possibles de ces aléas climatiques, l'agriculteur peut prendre deux types de décisions. A court terme c'est-à-dire à l'échelle intra-annuelle, les assolements sont fixés¹ et les seules variables d'ajustement dont il dispose sont les tactiques d'irrigation à associer à chaque culture. A long terme, les assolements c'est-à-dire ici les parts de surface agricole utile attribuées à chaque système de culture, peuvent être également modifiés par l'agriculteur. L'hypothèse sous-jacente est que ces choix de systèmes de culture sont effectués une fois pour toutes par l'agriculteur (étant donné la distribution de l'aléa climatique et étant donné l'ensemble des paramètres du modèle) et qu'ils ne peuvent pas être optimisés en fonction de la réalisation de l'aléa climatique. Le problème de l'agriculteur représentatif consiste donc à allouer sa surface agricole utile entre différents systèmes de culture possibles, tout en optimisant le choix des tactiques d'irrigation en fonction des réalisations de l'aléa climatique.

L'utilisation du modèle biophysique STICS

On a supposé que l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées est en mesure de calculer, pour chaque décision possible, (système de culture et tactique d'irrigation) la valeur de sa fonction objectif de manière à pouvoir prendre des décisions optimales. Le modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur doit donc être en mesure de représenter ces différents choix. Pour cela, nous avons utilisé la version STICS-C du modèle agronomique STICS, voir Poupa (2006).² Cette version permet d'associer à chaque vecteur d'irrigation possible le rendement de la culture considérée (nous avons retenu comme variable de rendement la « matière sèche des organes récoltés à 0% d'humidité » directement fournie en sortie de STICS). Notons que nous ne réalisons en fait pas un véritable couplage de STICS avec un modèle économique. Dans un premier temps nous générons l'ensemble des stratégies d'irrigation possibles pour un agriculteur pour chaque système de culture. STICS sert alors à associer à chaque stratégie un rendement. Dans un deuxième temps, le modèle d'optimisation économique sélectionne la ou les stratégies optimales en fonction des contraintes (quantité d'eau disponible, interdiction d'irriguer à certaines dates, etc.) et du critère à optimiser (espérance d'utilité du profit).

Le calibrage du modèle pour la région Midi-Pyrénées

Les principales valeurs utilisées pour paramétrer le modèle biophysique STICS sont présentées en Annexe A, Reynaud (2006-a).

Nous avons limité le nombre de systèmes de culture pouvant être utilisés par l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées à 3.³ Le système A correspond à une monoculture maïs, B à une rotation Blé dur – Blé dur – Sorgho et le système C à une rotation Blé dur – Tournesol. Ainsi, à long terme le problème d'optimisation de l'agriculteur consiste à déterminer quelle proportion de sa surface agricole utile doit être allouée à chacun des 3 systèmes de culture de manière à maximiser l'espérance d'utilité de son profit. Les résultats des simulations biophysiques étant fortement dépendantes de la nature des sols, nous avons retenu trois sols différents sur lesquels seront conduits des exercices de statique comparative.

Le modèle économique a été paramétré en utilisant les données de prix, de coût et de primes

¹ On fait l'hypothèse que le choix de systèmes de culture (c'est-à-dire de part de SAU à allouer à chaque culture) est un choix de long terme qui ne peut pas être modifié chaque année. Cela paraît raisonnable par exemple pour le maïs irrigué qui peut nécessiter des équipements en irrigation importants.

² Le couplage des modèles agronomiques et économiques s'inscrit dans une tradition qui remonte au début des années 1990. Cette tradition a été largement initiée aux Etats-Unis par le Ministère de l'Agriculture (USDA) qui était alors fortement préoccupé par la mise en place d'une politique efficace de conservation des sols agricoles. Plus tard, les travaux utilisant des méthodes de couplage ont porté sur la question de la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole et sur des problèmes de gestion de pollution par les nitrates ou bien par les pesticides.

³ Le choix des systèmes de culture représentatifs en Midi-Pyrénées a été effectué avec l'aide d'experts régionaux dans le cadre de l'expertise collective sécheresse, voir Amigues et al. (2006) et Brisson et al. (2006). Le système « A » est le plus consommateur en eau, à base de cultures entièrement irriguées. A l'opposé, le système « C » est le plus économe avec des cultures conduites sans irrigation (appelées aussi cultures pluviales). En position intermédiaire le système « B » utilise l'irrigation d'appoint, qui ne couvre qu'une partie des besoins en eau des plantes.

compensatoires à partir des fiches production du modèle SICOMORE développé par la chambre d'agriculture de Midi-Pyrénées (CRA-MP). Le modèle économique a été calibré sur l'année 2000-2001. Ce choix résulte de deux principales contraintes. D'abord, il s'agit de la dernière année pour laquelle il est possible de connaître, via les données du modèle SICOMORE, les coûts unitaires de production par culture pour différents sols de la région Midi-Pyrénées. Ensuite, il est préférable de calibrer le modèle sur une année « moyenne » plutôt que sur une année sèche.

Principaux résultats

En termes de possibilité d'adaptation de l'agriculteur face au risque de sécheresse, à court terme, c'est-à-dire à un système de cultures donné, il apparaît que les capacités d'adaptation des agriculteurs (via le choix des tactiques d'irrigation) semblent assez limitées et donc que le coût économique induit par les épisodes de sécheresse peut être élevé pour l'agriculteur. Par exemple, multiplier par 2 le risque de réalisation d'une année sèche se traduit par une perte de 11.78% de la fonction objectif de l'agriculteur. Imposer des interdictions d'irrigation en période d'étiage lors d'une année de sécheresse et lorsque l'agriculteur n'est pas à même de les anticiper se traduit par une perte de sa fonction objectif supérieure à 50%. Il convient de relever, que même à court terme et dans le système de culture A (monoculture maïs irrigué), l'agriculteur apparaît sensible à l'outil tarifaire. Un doublement du prix unitaire de l'eau se traduirait par une baisse de l'irrigation de 25.5% en cas de sécheresse. A long terme, c'est-à-dire lorsque l'agriculteur peut modifier ses systèmes de culture, les résultats des simulations économiques suggèrent une situation assez différente. Il apparaît en effet que l'adaptation des systèmes de culture permet de limiter de manière très sensible le coût privé pour l'agriculteur des épisodes de sécheresse. Par exemple, la perte résultant du doublement de la fréquence des sécheresses est divisée par deux dans le cas où des réallocations des surfaces entre systèmes de culture sont possibles (5.08% contre 11.78%). Ainsi la réallocation des surfaces entre systèmes de culture combinée aux ajustements intra-annuels de tactiques d'irrigation permettent d'atténuer de manière sensible l'impact de l'augmentation du risque de sécheresse sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif (critère d'espérance d'utilité).

Nous montrons également qu'il est important pour l'agriculteur d'anticiper le risque de sécheresse et les interdictions d'irriguer. A court terme, une information sur le risque d'interdiction d'irriguer en période d'étiage transmise de manière précoce aux agriculteurs permet de limiter de manière significative la perte de fonction objectif. De plus, la perte de fonction objectif est d'autant plus grande que la période à laquelle l'agriculteur apprend qu'il y aura une interdiction est tardive. Par contre, toujours à court terme, lorsque l'agriculteur ne peut pas anticiper les interdictions d'irrigation en période d'étiage lors des années sèches, sa perte de fonction objectif est très importante (elle atteint -53.82% de sa fonction objectif). A long terme (l'agriculteur est capable de réallouer librement ses surfaces entre les trois systèmes de culture), la perte résultant des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiages est modérée, que l'agriculteur anticipe ces interdictions dès la première période ou non (perte de -1.80%). Les décisions de long terme de l'agriculteur permettent d'atténuer de manière très importante le coût des restrictions d'irrigation en période d'étiage. Par exemple, à court terme la perte de fonction objectif induite par une interdiction anticipée dès la première période représente -9.94%. Dans les mêmes conditions mais à long terme, la perte représente seulement -1.87%. Il semble également qu'une information disponible en début de campagne pour l'agriculteur sur le risque de sécheresse et la possibilité d'interdiction d'irrigation en période d'étiage permette de réduire de manière considérable le coût privé de l'interdiction d'irrigation pour l'agriculteur en cas de sécheresse. Lorsque cette information est disponible, la perte pour l'agriculteur mesurée en terme de fonction objectif représente 9.94% à court terme contre plus de 50% sans information. Ce résultat nécessite toutefois des travaux supplémentaires de validation. En terme de recommandation de politique économique, ces résultats suggèrent qu'il est important pour le décideur public de faciliter les changements de système de culture, via la mise en place de mécanismes incitatifs, d'aide technique, de transmission d'information, par exemple. Ces résultats suggèrent également que des mécanismes d'alerte précoce des sécheresses peuvent générer des gains substantiels pour l'agriculture (on ne tient cependant pas compte ici que la puissance publique peut se tromper en annonçant une sécheresse et que cette erreur d'annonce peut se traduire par un coût pour l'agriculture). De multiples pistes d'extensions du modèle présenté permettraient d'améliorer le modèle présenté dans ce chapitre.

Enfin, nous montrons que les préférences des agriculteurs vis-à-vis du risque (niveau d'aversion) ont un impact important sur le niveau des primes de risque qu'un agriculteur est prêt à payer pour ne plus supporter le risque de sécheresse, dans le cadre d'un système d'assurance à développer. Ainsi, les primes de risque pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées sont estimées de quelques euros par hectare dans le cas d'une aversion au risque faible à plus de 30 euros par hectare pour un agriculteur fortement averse au risque. L'étude montre également qu'une différenciation des primes de risque en fonction de la nature du sol peut être envisagée dans le cas de préférences vis-à-vis du risque très marquées.

Conclusion

Nous avons analysé l'impact de la sécheresse sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées en distinguant les décisions optimales de court-terme (choix des tactiques d'irrigation) et celles de long terme (choix des systèmes de culture). La méthode développée a consisté à utiliser des sorties de simulations d'un modèle agronomique (STICS) dans un modèle d'optimisation économique du comportement de l'agriculteur.

Le modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur que nous avons développé permet de répondre à un certain nombre de questions qui apparaissent, pour l'économiste, fondamentales pour appréhender de manière pertinente l'impact de la sécheresse sur l'agriculture en France. Ce travail ouvre la porte à de multiples extensions qui nécessiteraient de plus amples travaux de recherche en économie agricole notamment sur l'impact de l'aversion au risque de l'agriculteur sur ses décisions optimales de court et de long terme, sur l'introduction d'autres variables de décisions jugées pertinentes (modifications des dates de semis, décision d'investissement dans des ouvrages hydrauliques tels que des retenues collinaires). On pourrait également s'intéresser de manière plus précise à la mise en place de mécanismes d'annonce précoce des sécheresses par la puissance publique et au calcul de la date optimale d'annonce. La date optimale d'annonce de la sécheresse par la puissance publique devrait mettre en balance le gain pour l'agriculteur résultant des adaptations en terme de stratégie d'irrigation rendues possibles par cette annonce précoce avec la perte résultant d'un comportement trop précautionneux dans le cas où la sécheresse annoncée ne se produit pas.

Références

- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (2006) Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72 p.
- Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C. et Debaeke P. (2006) Impacts de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique. Document de travail réalisé dans le cadre de l'expertise collective sécheresse de l'INRA. 30 p. Disponible sur http://www.inra.fr/les_partenariats/expertise/expertises_realisees/secheresse_et_agriculture_rapport_d_expertise.
- Poupa, J-C. (2006) Rétro-ingénierie de programmes Fortran. Application au modèle de simulation STICS, miméo INRA Rennes.
- Reynaud. A.. (2006) -a. Modélisation de l'impact économique de la sécheresse sur les grandes cultures : Une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques pour la région Midi-Pyrénées. Document de travail réalisé dans le cadre de l'expertise collective sécheresse de l'INRA. 37 p. Disponible sur http://www.inra.fr/les_partenariats/expertise/expertises_realisees/secheresse_et_agriculture_rapport_d_expertise.
- Reynaud. A.. (2006) -b. Adaptation à court et à long terme de l'agriculture au risque de sécheresse : Une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. Document de travail du projet ADD IMPACTS, n°1, novembre 2006, 36p. Disponible sur <http://www.toulouse.inra.fr/lerna/accueil.htm>.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'expertise collective « sécheresse » conduite en 2006 par l'INRA. Il n'a été rendu possible que grâce à la fourniture des données de calibrage du modèle STICS pour la région Midi-Pyrénées par Nadine Brisson que je tiens à remercier vivement. Ce travail a bénéficié de nombreuses discussions avec Jean-Pierre Amigues, Philippe Debaecke, et Alban Thomas. Qu'ils en soient également remerciés. L'étude n'aurait pu être techniquement réalisée sans le travail en amont accompli par Jean-Claude Poupa (SAE2 Rennes) de mise au point et d'optimisation informatique d'une versions améliorée de STICS. Je tiens enfin à remercier Jean-Marc Deumier d'Arvalis pour ses commentaires sur une version préliminaire de ce travail. Finalement, les opinions émises dans cet article sont celles de l'auteur. Elles n'engagent ni le LERNA, ni l'INRA.

COUPLAGE STICS / AROPAj
DEGRADATION PHYSIQUE DES SOLS AGRICOLES LIEE AU TASSEMENT :
CONSEQUENCES ECONOMIQUES

PHYSICAL DEGRADATION OF AGRICULTURAL SOILS DUE TO COMPACTION:
ECONOMIC CONSEQUENCES

PROJET ADD-DST

E. Baranger^{*1}, P-A. Jayet¹, J. Roger-Estrade², G. Richard³

¹ INRA, UMR Economie Publique, F-78850 Thierval Grignon

*ebaranger@grignon.inra.fr

² INA P-G, UMR d'Agronomie, Grignon (78850) ³ INRA, Unité de Science du Sol, Orléans (45000)

Introduction

Le tassement des sols est, avec l'érosion, un processus majeur de dégradation physique des sols en Europe. Ce phénomène couvrirait 33 millions d'hectares en Europe selon des études ISRIC (World Soil Information), soit 4% des terres (contre 12% touchées par l'érosion hydrique). Le tassement est lié à l'accroissement de la taille des engins agricoles et à l'augmentation de la surface moyenne cultivée par agriculteur, qui implique un nombre croissant d'interventions réalisées dans des conditions d'humidité excessive du sol, en particulier lors du travail du sol, des semis, des épandages d'amendements organiques et des récoltes.

Ce phénomène concerne l'ensemble des sols français et a des conséquences sur la production et sur l'environnement. Le tassement modifie les propriétés mécaniques et de transfert, avec des conséquences notamment sur l'érosion hydrique et le lessivage des nitrates, favorise la dénitrification, il ralentit l'activité microbiologique du sol et, par conséquent, la vitesse de minéralisation de la matière organique. Le projet DST (Dégradation des Sols par le Tassement), qui s'inscrit dans le programme fédérateur ADD (Agriculture et Développement Durable), répond au regain d'intérêt porté au tassement en raison des implications environnementales évoquées ci-dessus, mais aussi du fait de l'impact de cette dégradation des qualités physiques du sol sur la production, tout particulièrement dans un contexte de développement des techniques simplifiées de travail du sol. L'un des volets du programme a pour objet le couplage d'un modèle économique AROPAj (Debove *et al.*, 2005) et le modèle STICS, afin de disposer d'un outil permettant, à l'échelle régionale, nationale ou européenne, de prévoir l'impact sur la production agricole et sur l'environnement de différentes mesures de politique publique visant à prévenir le tassement des sols.

Un travail antérieur avait montré qu'il était possible de réaliser ce couplage via des courbes de réponse du rendement à l'azote (Godard *et al.*, 2005). Ce travail avait permis d'adapter le modèle économique, fonctionnant à l'échelle européenne, à la diversité des conditions de production (climat, sol, technique) des différentes régions d'Europe.

Dans le projet DST, ce couplage a été perfectionné afin d'intégrer, grâce à STICS, l'effet du tassement sur la réponse à l'engrais azoté des principales grandes cultures européennes. La notion de fonction de réponse et le couplage STICS-AROPAJ sont en voie d'extension avec la réponse des émissions de protoxyde d'azote, permettant d'ajouter un volet environnemental à l'analyse.

Méthodes

Aspects agronomiques : entrées et paramétrisation de STICS

L'échelle régionale de travail est imposée par le modèle économique AROPAj. Définies statistiquement, les « Exploitations-Types » du modèle économique sont des entités virtuelles construites à partir de données de nature comptables, issues du RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole), et observées dans chaque région (surface, assolement, cheptel, ...).

Pour chaque culture de chaque Exploitation-Type, les données comptables ont été complétées à la fois par des données techniques (date de semis, variété, fertilisation, irrigation,...) et par les entrées "sol" et "climat" nécessaire à STICS (Godard, 2005).

Les données techniques et économiques précédentes sont reprises et seules les données "sol" sont modifiées. Nous introduisons un nouveau sol, de type limon moyen, sous deux états physiques différents ; à savoir un état "non-tassé" et un état "tassé". La modification du fichier "sol" porte sur la masse volumique (1.35 g.cm^{-3} en sol non tassé et 1.60 g.cm^{-3} en sol tassé) et sur une conséquence du tassement, à savoir la vitesse d'infiltration (2.8 mm.j^{-1} en sol non tassé et 2 mm.j^{-1} en sol tassé).

La base de données ARTIX (Niang *et al.*, 2005) (qui est également une application), nous a permis de réaliser en batch, pour un jeu d'entrées donné, des simulations STICS en faisant varier les apports d'azote de 0 à 600 kg d'azote par hectare, par pas de 20 kg.N.ha⁻¹.

Les simulations sont réalisées pour :

- les Exploitations-Types des régions Ile de France et Picardie,
- les cultures de blé tendre, orge d'hiver, maïs, colza, tournesol et betterave,
- les sols non-tassé (NT) et tassé (TT),
- trois types d'année climatique : sèche (2005), humide (2001) et correspondant à la référence économique (1997).

Pour chaque combinaison d'entrées, nous avons récupéré les données de rendement en fonction des doses d'azote apportées, ce qui nous a permis, en utilisant le logiciel SAS, d'ajuster une courbe de réponse du rendement à l'azote de type exponentielle :

$$R = B - (B - A) \exp(-\tau \cdot N) \quad [1]$$

où : **R** est le rendement (t.ha⁻¹), **A** le rendement minimal, **B** le rendement maximal, **N** la quantité d'azote (kg.ha⁻¹) et **τ** le facteur de courbure.

L'utilisation dans STICS du fichier param.sol paramétré avec un sol tassé (resp. non tassé) revient à considérer que l'ensemble de la parcelle est uniformément tassé (resp. non tassé), ce qui ne correspond pas à la réalité. Pour contourner cette difficulté, nous avons utilisé les résultats de Godin (2005) qui a calculé le pourcentage de surface affectée par le tassement par grand type de système de culture. Ainsi nous avons pu pondérer, grâce à ce pourcentage, les effets du tassement sur la réponse à l'azote des cultures étudiées. Les pondérations retenues et utilisées sont présentées dans le tableau 1. Le « type de sol » issu de ces pondérations est désigné par « sol MT ».

Couplage et aspects économiques : STICS-AROPAj

AROPAj est un modèle micro-économique d'offre agricole "multi-producteurs" et "multi-produits" de programmation linéaire (Debove *et al.*, 2005). Le modèle optimise la marge brute de chaque Exploitation-Type en jouant sur l'allocation des terres, la destination des produits végétaux (collecte ou consommation à la ferme), l'alimentation et la taille des troupeaux, sous contraintes techniques (tassement du sol) et économiques (PAC, taxes sur les émissions de N₂O, ...).

Depuis les travaux de Godard (2005), nous avons remplacé dans AROPAj le paramètre « rendement de la culture » jusqu'alors fixé par une valeur régionale moyenne, par une valeur variant en fonction des conditions techniques et physiques prévalant dans chaque Exploitation-Type. Ainsi le couplage STICS / AROPAj se fait grâce aux paramètres **A**, **B** et **τ** de l'équation [1] (Jayet *et al.*, 2005). Ces paramètres, déterminés pour l'ensemble des combinaisons régions (2 modalités) X sols (3 modalités) X cultures (6 modalités)* climats (2 modalités), constituent les entrées complémentaires du modèle économique relatives au tassement.

Résultats

Rendements et courbes de réponses

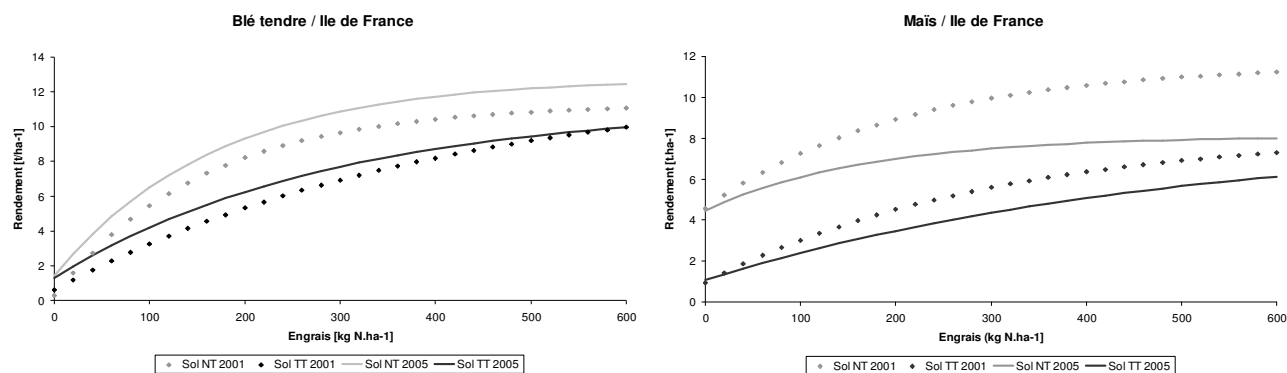


Figure 1 : Courbes de réponse à l'azote pour les cultures de blé tendre et de maïs en sol NT et TT de la région Ile de France pour les années 2001 et 2005

Le tassement du sol provoque une diminution de l'espace poral et une augmentation de la résistance mécanique du sol rendant plus difficile la colonisation racinaire. De plus, les transferts d'eau et les cycles du carbone et de l'azote sont affectés dans des sens parfois contradictoires : la diminution du volume

des vides et de la conductivité hydraulique limitent la quantité d'eau retenue mais ralentissent son écoulement. La réduction de la teneur et de la diffusion de l'oxygène freine la nitrification mais augmente la dénitrification (particulièrement en année humide). Ces différents processus se traduisent globalement par une diminution de la production de matière sèche, quelle que soit la plante considérée (Figure 1).

Pour le sol considéré dans notre étude, quelle que soit l'année climatique, la culture ou la région, l'impact du tassement sur le rendement est significatif, avec des diminutions consécutives de production. Pour la culture de blé tendre en 2001 et en Ile de France, par exemple, la diminution de rendement entre les deux types de sol est de 3.3 t.ha⁻¹ (soit 39%) pour une dose d'azote de 200 kgN.ha⁻¹ (Figure 1). Dans les mêmes conditions, le maïs, enregistre une diminution est de 3.8 t.ha⁻¹ (soit 42%).

Nos simulations mettent en évidence que les conséquences du tassement dépendent des conditions climatiques. La combinaison sol tassé * année humide (2001), favorise la dénitrification et l'anoxie racinaire : elle pénalise d'avantage les cultures d'hiver que l'association sol tassé * année sèche (2005). En revanche pour les cultures de printemps (betterave, maïs et tournesol), avec de forts besoins en eau durant la période estivale, les rendements "sol tassé * année humide" sont supérieurs aux rendements "sol tassé * année sèche" (Figure 1).

Des sols à la parcelle

La pondération de nos courbes de réponses à l'azote obtenues en sol NT et TT (Figure 2), nous a permis de modérer l'impact du tassement des sols sur la production et d'obtenir des simulations plus proches de la réalité de la pratique agricole.

Marges brutes et assolements

L'introduction dans le modèle économique AROPAj des courbes de rendement en condition de sol NT et MT nous a permis de comparer l'impact du tassement des sols sur les marges brutes régionales et par culture ainsi que sur l'assolement des Exploitations-Types. Nous ne présenterons ici que les résultats obtenus pour la région Ile de France. Cette région est divisée en deux classes d'exploitations selon leurs orientations techniques et économiques (OTE) : Grandes Cultures et Polycultures (bovin lait). La marge brute par culture est affectée par le tassement. En Figure 3 sont présentées les marges brutes en €.ha⁻¹ pour l'Exploitation-Type 1 « Grandes cultures » de la région Ile de France en année humide (2001). Les marges brutes pour les cultures d'hiver subissent les plus fortes diminutions de marge (à l'exception de l'orge d'hiver) ce qui est cohérent avec les résultats habituellement observés en année humide. La diminution moyenne en culture d'hiver (orge non comprise) est de 13.5% alors qu'elle n'est que de 10.6% en culture de printemps.

Cultures	Part de Sol en %	
	NT	TT
Blé de betterave	30	70
Blé de maïs	55	45
Blé de colza	75	25
Orge d'hiver	75	25
Colza	75	25
Betterave	75	25
Maïs	75	25
Tournesol	75	25

Tableau 1 : Part de sol NT et TT (en %) à l'échelle de la parcelle pour l'ensemble des cultures étudiées. (Godin. 2005)

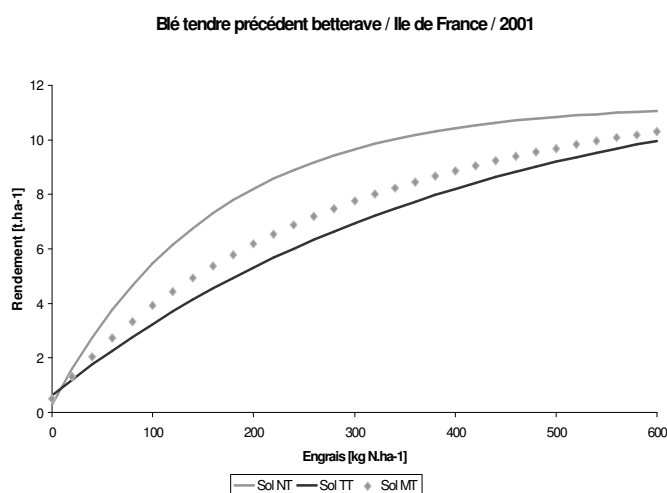


Figure 2 : Courbe de réponse à l'azote pour la culture de blé tendre précédant betterave en sol NT, TT et MT (pondération : 70%TT et 30%NT) de la région Ile de France pour l'année 2001.

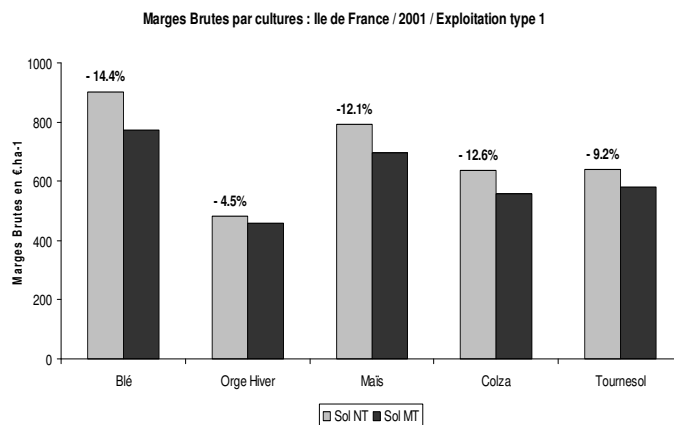


Figure 3 : Marge brute des grandes cultures de la région Ile de France pour l'année 2001 (humide).

Au niveau régional, la diminution de la marge brute globale est de 5.8% pour l'année 2001 et 7.3% pour l'année 2005. En plus de la variation annuelle, la diminution de marge brute est liée à la catégorie d'Exploitation-Type considérée. En effet, les exploitations de type Polyculture (avec bovins lait) ne dégagent pas uniquement leurs marges des grandes cultures et subissent donc moins l'effet dépressif du tassement sur leurs résultats économiques. Sur les deux années considérées, la diminution moyenne de marge brute est de 7% en grandes cultures et de 5,1 % seulement en polyculture élevage.

Diminution de marge brute en %	2001	2005
Région Ile de France	5.8	7.3
ET1 : Grandes cultures	6.3	7.7
ET2 : Polyculture élevage	4.2	6.0

Tableau 2 : Diminution de la marge brute globale au niveau de la région Ile de France et de ses Exploitations Types pour les années 2001 (humides) et 2005 (sèche) sous l'effet du tassement.

Les impacts du tassement sur la répartition des cultures au niveau régional sont plus modérés. En effet les cultures sont dans l'ensemble pénalisées par le tassement et par la diminution de rendement. Le tassement n'entraînant pas d'avantage compétitif d'une culture par rapport aux autres, la part de chacune dans l'assolement varie peu. A titre d'exemple, en Ile de France en 2001, la part de surface de maïs diminue de 2% (de 5% à 3%), ce qui est compensé par une augmentation équivalente de la surface en orge (plus « résistante » au tassement, voir ci-dessus) dont la part passe de 10% à 12 %. En 2005 (année sèche), aucune variation n'est constatée.

Conclusion et perspectives

L'utilisation du modèle STICS nous a permis d'évaluer dans un premier temps l'impact du tassement des sols sur les rendements des grandes cultures des régions Ile de France et Picardie. Notre analyse par modélisation a tout d'abord fait ressortir l'impact négatif du tassement sur le rendement des cultures et a souligné l'importance de l'interaction de cet effet avec le climat. Dans un second temps, l'introduction des courbes de réponse à l'azote dans le modèle économique a permis de quantifier les différents impacts économiques du tassement. Si les conséquences sur les marges brutes se sont révélées importantes, celles sur la répartition des cultures au sein de chaque assolement régional sont beaucoup moins marquées.

Prolongeant cette première étude et celle réalisée par Sophie Durandeu sur l'estimation de la dénitrification avec le modèle STICS, le travail à venir consiste à estimer les émissions de N₂O en condition de sol tassé et à utiliser l'outil pour comparer différents systèmes de régulation des émissions par le biais de taxes ou de subventions.

Les auteurs remercient le programme ADD de l'Agence Nationale de la Recherche pour leur soutien au projet DST (Dégradation des Sols liée au Tassement) au sein duquel le travail a été effectué.

Références

- Debove E., Chakir R. and Jayet P. A. (2005) "Decoupling of direct payments: an application of the AROPAj model projecting regionally differentiated impacts on the EU-15 farming sector (preliminary results). Expert workshop jointly organized by DG JRC, DG AGRI, SG RTD, JRC Séville, 6-7 octobre 2005." 21.
- 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. Grignon, INRA : UMR Economie Publique.
- Godard C., Bamière L., Debove E., DeCara S., Jayet P. A. and Niang B. (2005) Interface between agriculture and the environment: integrating yield response function in an economic model of EU agriculture. Seminar EAAE, Parma.
- Godin T. (2005) Mémoire de fin d'étude : Evaluation des contraintes engendrées par les engins dans les systèmes de grande culture, viticoles et forestier français., Projet ADD-DST / ESITPA / INRA / CIVC: 76.
- Jayet P. A., Godard C. and Debove E. (2005). Couplage de STICS avec AROPAj : Un modèle d'interfaçage par le biais de courbes de réponses. Séminaire STICS, Carry le Rouet.
- Niang N., Godard C. and Jayet P. A. (2005) ArtTix : base de données et solution logicielle autour du couplage de STICS et du modèle économique AROPAj. Séminaire STICS, Carry le Rouet.

MO_USTICS : INTEGRATION DE STICS DANS LE MODELE DECISIONNEL DE MODERATO

J.-E. Bergez*, M.-H. Charron

INRA, UMR 1248 AGIR, MAGE, BP 52627 - F 31326 Castanet Tolosan Cedex.

*jbergez@toulouse.inra.fr

Introduction

Le rapport du CGGREF sur l'irrigation durable (Levy *et al.*, 2005) et l'expertise sècheresse INRA (Amigues *et al.*, 2006) ont souligné l'importance de renouveler les recherches sur la gestion de l'eau à différentes échelles spatiales et temporelles. Les travaux menés par l'équipe MAGE de l'UMR AGIR de Toulouse intègre recherches méthodologiques sur la modélisation et questionnements quant à la gestion de l'eau aux échelles sole irriguée et territoire. Afin de fournir des éléments de réponse à la problématique de l'irrigation et de la gestion territorialisée de l'eau, il nous semble fondamental de non seulement pouvoir disposer d'un modèle de culture plurispécifique mais également de lier ce modèle à un modèle de décision qui permet de prendre en compte certaines contraintes organisationnelles. C'est dans cet objectif que nous avons développé le modèle MO_USTICS qui est la résultante d'une intégration de STICS (Brisson *et al.*, 1998) dans le modèle décisionnel de MODERATO (Bergez *et al.*, 2001).

Matériel et méthodes

Historique

En 2003, un groupe projet STICS C s'est constitué à la faveur du démarrage de différents projets de couplage de STICS avec d'autres modèles : économique (JC Poupa, ESR Rennes), forestier (I Lecomte, System Montpellier), décisionnel (MH Charron-Moirez, Arche Toulouse). Tous les intervenants partageaient un intérêt commun pour la naissance d'une version en langage C de STICS vérifiant en plus d'autres qualités : modularité, clarification/nettoyage du code et des variables. L'idée était de partager le travail. Cependant, les temporalités des différents projets, leurs échéances et leurs objectifs ont fait qu'en pratique, le groupe n'a pas bien fonctionné. Au final, en 2005, nous avons récupéré la version développée par I. Lecomte qui avait corrigé la version initialement produite par JC Poupa. En 2006, nous avons transmis notre version modifiée au projet MELODIE (Rennes).

Choix techniques

Le couplage nécessite deux activités :

- *couplage scientifique* : identifier les variables d'état de STICS, les variables décisionnelles de MODERATO (indicateurs de décision), établir les correspondances entre variables de STICS et de MODERATO.

- *couplage informatique* : la conception orientée objet de MODERATO est un atout pour changer son modèle

biophysique. Le couplage s'est fait simplement en intégrant le code de STICS dans une classe dénommée TModèleBiophysique et qui représente le modèle biophysique tout en respectant son interface. L'échange d'information entre les deux modèles est pris en charge par une classe tampon (TEnregistreur). Par contre, la forme non-modulaire, le très grand nombre de variables globales du code STICS (stockées dans des gros tampons) impose un couplage très intégratif et de ce fait, difficile à faire évoluer. Enfin, le très grand nombre d'options dans le modèle STICS (branchements) ne facilite pas les tests.

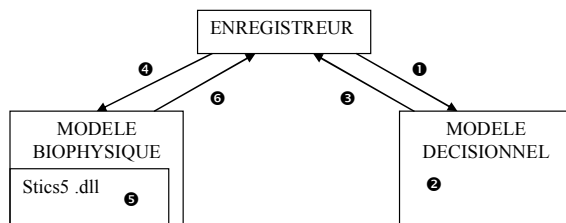


Figure 1 : Intégration de STICS dans MODERATO

Le couplage fonctionne à un pas de temps journalier (Figure 1) :

1. Consultation des variables décisionnelles dans l'enregistreur
2. Exécution des règles de décision
3. Mise à jour de l'enregistreur
4. Consultation des variables d'entrée dans l'enregistreur
5. Exécution du modèle biophysique : appel des sous-programmes de la dll stics5
6. Mise à jour de l'enregistreur : copie des valeurs des variables d'intérêt des tampons dans l'enregistreur.

Les choix suivants ont été faits : les paramètres sol et plante sont gérés par STICS. Seuls les aspects décisionnels et le climat sont gérés par MODERATO.

Jeux de test

Le couplage a été tout d'abord testé sur une culture de maïs irriguée en utilisant une série climatique 49 ans (Toulouse) et un sol boubène de 0.8 m de profondeur. Deux stratégies de conduite liées à des contraintes différentes ont été simulées (Tableau 1)

	Test1	Test2																				
Contexte	Debit maximum (mm/jour): 3.5 Taux d'utilisation maximum (h/jour): 24 Dose minimale permise (mm): 5 Dose maximale permise (mm): 100 Jours sans irrigation: 0,0,0,0,0,0,0, Volume disponible pour la saison d'irrigation (mm): 200	Debit maximum (mm/jour): 4.5 Taux d'utilisation maximum (h/jour): 24 Dose minimale permise (mm): 5 Dose maximale permise (mm): 100 Jours sans irrigation: 0,0,0,0,0,0,0, Pas de volume limitant																				
Semis	Le semis a lieu entre le 20/04 et le 30/05 Dès que la somme des pluies des 3 jours précédents est <15mm On sème cecilia à 80000pl/ha																					
Récolte	La récolte a lieu au maximum le 15/10 Ou lorsque la somme de Température depuis le semis atteint 2100 °Cj Ou lorsque l'humidité du grain atteint 20% Dès que la somme des pluies des 3 jours précédents est <15mm																					
Irrigation	Règle d'irrigation au semis Pas de règle pour l'irrigation de semis Règle de déclenchement de l'irrigation Si la somme de température depuis le semis >=500 °Cj Et si sur les 5 derniers jours la pluie cumulée <10mm et l'ETP cumulé >=15mm Alors on déclenche la campagne d'irrigation On apporte 25mm Quoiqu'il en soit, on ne déclenche plus après 2000 °Cj Règle de retour de l'irrigation Retour basé sur une périodicité fixe de 8j On apporte 30mm Pas de modulation en fonction du volume restant Règle d'arrêt de l'irrigation Si la date >01/09 Et si le déficit >=90mm Alors on lance une dernière irrigation On apporte 20mm ArrêtTourEau=10 Règle d'attente climatique Si la somme des pluies (>=2mm) des 5 derniers jours dépasse 10mm Alors on retarde l'irrigation d'1 jour pour chaque 4mm L'attente maximale est de 7j La règle de pluie est valide pendant et hors tour d'eau	Règle d'irrigation au semis Si on est 10j après le semis Et si la somme des pluies est <15mm Alors on apporte 15mm Le tour d'eau est arrêté s'il pleut plus de 10mm On ne retire pas la dose apportée au volume total disponible Règle de déclenchement de l'irrigation Si la somme de température depuis le semis >=600 °Cj Sinon si déficit hydrique >60 mm Alors on déclenche la campagne d'irrigation On apporte 25mm Quoiqu'il en soit, on ne déclenche plus après 2000 °Cj Règle de retour de l'irrigation Retour basé sur le déficit en eau du sol <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>AvFlo</th> <th>Flo</th> <th>Remp1</th> <th>Remp2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Déficit</td> <td>60</td> <td>60</td> <td>70</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>Dose fixe</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dose (mm)</td> <td>25</td> <td>35</td> <td>30</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table> Pas de modulation en fonction du volume restant Règle d'arrêt de l'irrigation Si la somme de température depuis le semis >1500 °Cj Et si le déficit >=90mm Alors on lance une dernière irrigation On apporte 20mm ArrêtTourEau=10 Règle d'attente climatique Si la somme des pluies (>=2mm) des 5 derniers jours dépasse 10mm Alors on retarde l'irrigation d'1 jour pour chaque 4mm L'attente maximale est de 7j La règle de pluie n'est valide que pendant le tour d'eau		AvFlo	Flo	Remp1	Remp2	Déficit	60	60	70	80	Dose fixe					Dose (mm)	25	35	30	25
	AvFlo	Flo	Remp1	Remp2																		
Déficit	60	60	70	80																		
Dose fixe																						
Dose (mm)	25	35	30	25																		

Tableau 1 : Stratégies de conduite testées avec MO_USTICS

Une fois établies les correspondances entre sorties STICS et sorties MODERATO, tous les outils d'analyse développés pour les deux modèles sont utilisables avec MO_USTICS. Pour ce qui est de MODERATO, il s'agit: de statistiques élémentaires sur la série climatique (Figure 2), du graphe de fonctionnement du système pour une année donnée (climat, bilan hydrique, croissance de la plante, calendrier d'irrigation).

	Moy.	EcTy.	Min.	Q1	Med.	Q2	Max.
Rdt 15 % (q/ha)	113	11	89	102	115	124	129
RdtPot 15 % (q/ha)	122	8	105	114	123	129	135
Drain (mm)	12	19	0	0	1	20	89
Eau (mm)	190	20	115	175	200	200	200
Marge (€/ha)	681	129	414	563	691	809	876
Effic (q/mm)	0.051	0.010	0.038	0.044	0.049	0.056	0.091
Diff (%)	7	7	0	1	5	15	23
Def Dbt (mm)	11	4	4	8	11	15	21
Def Fin (mm)	43	17	4	31	45	57	74
Prix de vente : 10.67€/q - Coût de l'eau : 0.76 €/mm - Coûts fixes : 327.77€/ha - Coût d'un tour : 7.63 €/tour							
Points déviants: +/- 1.5 e.t.							
Rendement	+						
	-	1990 1991 1994 1995					
Marge	+	1974					
	-	1990 1991 1994 1995					
Les trois années avec une différence relative de rdt au potentiel la plus élevée							
1990 1949 1962							
Satisfaction moyenne en eau durant la phase de préfloraison=1							
Satisfaction moyenne en eau durant la phase de floraison=0.966							
Satisfaction moyenne en eau durant la phase de postfloraison=0.789							

Figure 2 : Exemple de sorties des macros d'analyse de MODERATO

d'autres opérations culturales et notamment la fertilisation et permettre des analyses des interactions Eau x Azote en intégrant un aspect gestion de la culture.

Cependant, outre la réussite « technique » du couplage, il est fondamental de pouvoir améliorer les performances de l'outil ainsi créé afin de favoriser son utilisation notamment dans une optique de couplage à des optimisateurs de stratégies de conduite (Bergez et al., 2004). Pour se faire, il faut entre autres diminuer la taille des tampons de transfert, augmenter la rapidité d'exécution. Un autre problème soulevé est la possibilité du suivi de version : MO_USTICS intègre la version 5 de STICS. Le couplage via une dll devrait faciliter l'intégration d'autres versions en C... mais les améliorations de STICS sont écrites en FORTRAN.

Quoiqu'il en soit, il est prévu d'utiliser MO_USTICS dans le cadre d'un certain nombre de projets menés à l'UMR AGIR :

- dans le cadre de l'UMT-Eau en construction sur Toulouse, afin d'améliorer les stratégies d'irrigation et de fertilisation sur la sole irrigable ;
- dans le cadre du projet ANR-CLIMATOR, afin d'étudier l'impact du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation ;
- dans le cadre de la thèse de Lucie Clavel (encadrante D Leenhardt, projet ADD-APPEAU) pour tester des scénarios de spatialisation des systèmes de culture sur la demande en eau d'un territoire.

Références

- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A. (éditeurs) (2006) Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport. INRA (France), 72 p
- Bergez J.-E., Debaeke Ph., Deumier J.-M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D. (2001) MODERATO: an object-oriented decision model to help on irrigation scheduling for corn crop. *Ecol. Model.*, 137(1): 43-60.
- Bergez J.-E., Garcia F., Lapasse L. (2004) A hierarchical partitioning method for optimizing irrigation strategies. *Agric. Syst.*, 80: 235-253.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J. M., Meynard J.-M., Delécolle R. (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Levy J.D., Bertin M., Mazodier J., Combes B., Roux A. (2005) Irrigation Durable. CGGREF, 2185. 117 p.

Discussion – Conclusion

Les premiers essais menés montrent qu'il est possible de coupler les deux modèles et de bénéficier des outils d'analyse de chacun des modèles. A l'heure actuelle, nous avons testé le fonctionnement sur les cultures suivantes : maïs, soja, tournesol, sorgho. Le couplage pose encore un problème sur les cultures positionnées sur deux saisons climatiques (colza, céréales d'hiver). MODERATO, qui jusqu'à présent était essentiellement tourné vers la gestion de l'irrigation, va maintenant pouvoir évoluer vers la gestion

UTILISATION DU MODELE STICS POUR L'EVALUATION DES CONSÉQUENCES D'UNE POLLUTION RADIOACTIVE ACCIDENTELLE DU MILIEU AGRICOLE

USE OF THE MODEL STICS FOR THE EVALUATION OF THE CONSEQUENCES OF AN ACCIDENTAL RADIOACTIVE POLLUTION IN THE AGRICULTURAL ENVIRONMENT

V. Durand*, C. Mercat, B. Briand, A. Levain et B. Besson

IRSN, Laboratoire d'Etudes Radioécologiques Continentales et Marines. DEI/SESURE/LERCM, Centre d'Etudes de Cadarache, bâtiment 153, BP3, F-13115 Saint Paul lès Durance Cedex

*vanessa.durand-crit@irsn.fr

Introduction

Les conséquences pour l'homme et pour l'environnement d'une pollution d'origine industrielle dépendent de l'importance et de la nature de celle-ci mais aussi de l'environnement qui la reçoit. Ces conséquences seront en effet plus ou moins pénalisantes suivant les caractéristiques du milieu touché et suivant l'usage qu'en fait l'homme. L'objectif du projet SENSIB, initié en 2004 par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, est de construire une méthode de classification du territoire français sur la base de ses caractéristiques environnementales et sociétales. Le résultat attendu du projet SENSIB (Mercat-Rommens et Renaud, 2005 ; Mercat-Rommens et al., 2007) est un outil normalisé qui permet de représenter et de comparer sur une même échelle de valeur la sensibilité du territoire vis-à-vis d'une pollution radioactive. Cette normalisation des caractéristiques de l'environnement et des populations sera utilisable pour l'évaluation et la gestion des risques, à toutes les étapes de l'exploitation d'une installation nucléaire (avant la mise en exploitation, en fonctionnement normal, en situation accidentelle et post-accidentelle, lors du démantèlement). La connaissance de la sensibilité relative d'une surface nécessite d'étudier les facteurs qui déterminent cette sensibilité et qui sont susceptibles de la modifier, c'est à dire d'augmenter ou de diminuer les conséquences d'une pollution. Le projet SENSIB est actuellement orienté principalement sur l'étude des milieux agricoles du territoire métropolitain français en contexte post-accidentel. Il s'agit de participer à l'élaboration d'une méthode de classement des surfaces agricoles en fonction de leur sensibilité aux pollutions atmosphériques radioactives. En effet, après la phase accidentelle pendant laquelle des radionucléides ont pu être rejetés dans l'environnement, il convient d'analyser et d'estimer ce qui se produirait dans la phase suivante, dite post-accidentelle. L'objectif consiste à étudier la sensibilité de diverses productions agricoles vis-à-vis d'un rejet accidentel de radioactivité. Il s'agit de savoir si un dépôt uniforme et ponctuel entraînerait une contamination identique de ces productions à l'échelle du territoire national. Les études s'appuient sur le modèle ASTRAL (Assistance Technique en Radioprotection post-Accidentelle), un code de calcul développé par l'IRSN qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle (Mourlon et Calmon, 2002). On cherche donc à évaluer l'effet de la régionalisation des paramètres du modèle ASTRAL sur l'activité massique des produits agricoles soumis à un dépôt atmosphérique accidentel. Afin d'identifier les paramètres qui seraient susceptibles d'influencer significativement les transferts des contaminants dans la chaîne alimentaire, le logiciel STICS (Simulateur multidisciplinaire pour des Cultures Standard) de l'INRA-Avignon a été utilisé. Ce modèle propose en effet un suivi au pas de temps journalier de l'indice foliaire, variable qui a pu être corrélée à certains paramètres radioécologiques d'ASTRAL.

Le couplage entre le modèle de transfert de radionucléides dans la chaîne alimentaire ASTRAL et le modèle de culture STICS permet par ailleurs de confronter les valeurs de paramètres génériques utilisées dans ASTRAL aux valeurs issues de STICS qui prennent en compte certaines sources régionales de variabilité : conditions météorologiques, type de sol, système de culture.

Matériels et méthodes

La phase d'identification et de caractérisation des facteurs de sensibilité du milieu agricole passe par l'utilisation de modèles de transfert des radionucléides dans l'environnement dont on sélectionne les équations nécessaires à l'évaluation dans les compartiments de l'écosystème étudié. Les premiers travaux de SENSIB portent sur l'évaluation des transferts aux productions agricoles *via* le compartiment atmosphérique de quelques radionucléides choisis en tant qu'exemples (césium, strontium, iode).

Le modèle ASTRAL : présentation du code de calcul

ASTRAL est un code de calcul qui permet d'évaluer le transfert des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre suite à une émission atmosphérique accidentelle. Cet outil d'aide à la décision en cas de contamination radioactive importante de l'environnement se compose principalement d'un module de calcul qui fait appel à des bases de données géographiques et radioécologiques (paramètres de transferts). Ce modèle de radioprotection permet d'évaluer l'impact de dépôts de radioactivité sur les productions agricoles (activités massiques), les ressources agronomiques (surfaces et quantités concernées) et sur les populations (doses) des zones touchées par un éventuel accident. Les principales productions agricoles répertoriées par le Ministère de l'Agriculture ont été regroupées en une typologie comprenant 3 groupes et couvrant 15 « classes ASTRAL ». Les critères de regroupement sont l'appartenance à une famille agronomique, l'appartenance à une unité radioécologique (certains éléments de familles ou de variétés agronomiques différentes présentent des similitudes vis-à-vis des transferts de radioactivité et peuvent y être assimilés), les pratiques agricoles (calendriers agricoles...) et la destination. Dans le cadre de ces études, le champ a été limité au transfert foliaire car cette voie de transfert est prépondérante par rapport à la voie racinaire durant la première année suivant l'accident.

Un exemple d'équation permettant de calculer la contamination foliaire d'une production végétale est donné ci-dessous. Il s'agit du calcul de la contamination foliaire de l'herbe de pâture.

$$C_{vfol} = \frac{D_r}{Rdt_v} \cdot B \cdot C \quad \text{avec} \quad B = [K_r \cdot RC_{S_{v,r,Dat_D}} + (1 - K_r) \cdot RCh_{v,r,Dat_D,H_p}] \quad \text{et} \quad C = [a \cdot e^{-(\lambda_{bw} + \lambda_r)t} + (1 - a) \cdot e^{-(\lambda_L + \lambda_r)t}]$$

D_r : Dépôt total du radionucléide r sur l'ensemble du sol et des végétaux v ($Bq \cdot m^{-2}$)

K_r : Proportion du dépôt sec dans le dépôt total

Rdt_v : Rendement cultural du végétal v ($kg \text{ frais} \cdot m^{-2}$)

RC_s, RCh : Rapports de captation par temps sec et par temps de pluie

a : Pondérateur de décroissance

$\lambda_{bw}, \lambda_L, \lambda_r$: Constantes de décroissance par croissance biologique et lessivage des feuilles, à long terme et décroissance radioactive (j^{-1})

Dat_D : Date de dépôt

H_p : Hauteur de précipitation (mm)

t : Temps à partir du dépôt (j)

Ces paramètres se retrouvent pour la plupart dans le calcul de la contamination foliaire d'autres productions végétales telles que les céréales, les légumes frais à feuilles ou la vigne.

Paramètres étudiés

Les paramètres étudiés sont ceux dont on présume qu'ils peuvent être des facteurs de sensibilité, de par leur forte variabilité spatiale et la sensibilité statistique des équations aux valeurs que prennent ces paramètres. Il s'agit notamment du rendement et du rapport de captation, encore dénommé facteur d'interception. Le rapport de captation se définit comme le rapport sans dimension entre l'activité fixée par la végétation et l'activité totale déposée sur $1 m^2$. Dans le modèle ASTRAL, la valeur de la captation dépend uniquement de la surface développée par le couvert végétal au moment du dépôt, indépendamment de l'état physiologique de la plante (activité photosynthétique, sénescence...). Il correspond à la fraction de l'activité totale déposée qui est interceptée par la partie aérienne des végétaux. Il peut être estimé grâce à l'indice foliaire. Le modèle allemand, ECOSYS-87 (Müller et Pröhl, 1993), propose un mode de calcul du dépôt sur la plante et du dépôt total, dont le rapport équivaut à la captation : il postule qu'un dépôt radioactif sur une surface quelconque s'évalue par le produit d'une vitesse de dépôt par une concentration de radionucléides dans l'air et que la vitesse de dépôt sur la plante dépend de son développement foliaire.

$$RC_s = \frac{LAI_i / LAI_{i\max}}{(LAI_i / LAI_{i\max}) + (Vg_s / Vg_{i\max})} \quad \text{avec}$$

RC_s : Rapport de captation par temps sec

LAI_i : Indice foliaire de la plante i

$LAI_{i\max}$: Indice foliaire maximal de la plante i

$Vg_{i\max}$: Vitesse de dépôt maximale sur la plante i ($m \cdot s^{-1}$)

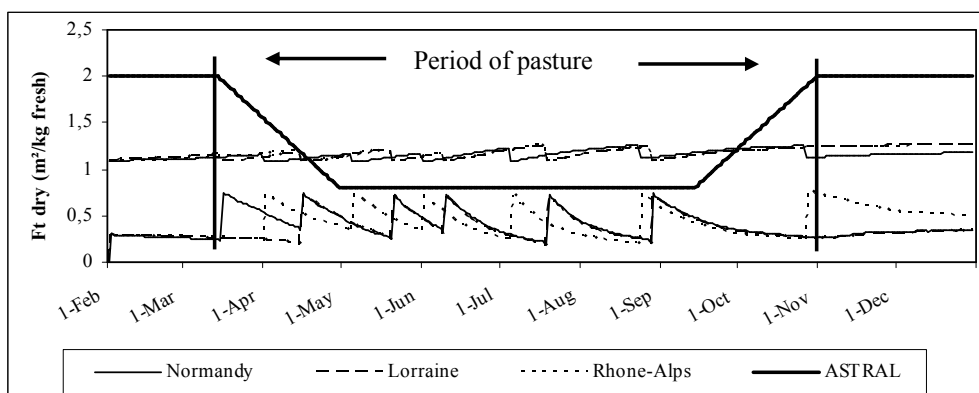
Vg_s : Vitesse de dépôt sur le sol ($m \cdot s^{-1}$), constante pour tout type de plante

Dans les études du projet SENSIB, le couvert végétal est supposé ne pas être au même stade à un temps t donné sur l'ensemble du territoire français. Les paramètres radioécologiques d'ASTRAL seront alors modifiés par l'utilisation du paramètre agronomique LAI , ce qui nous permet de prendre en compte la *variabilité* régionale et la *variabilité* des conditions culturales.

Utilisation du logiciel STICS

Du fait de l'importance primordiale des caractéristiques territoriales (climat, type de sol, type de pratiques agricoles) sur la sensibilité d'un territoire, l'acquisition de données agricoles récentes et leur analyse ont été réalisées afin d'identifier, pour chaque production agricole, les données les plus influentes sur la sensibilité. Cette approche a été accomplie pour les productions céréalières (Mercat-Rommens et al., 2006), les prairies permanentes (Durand et al., 2007a), la vigne (Levain et al., 2006), les légumes - feuilles (Durand et al., 2007b) et est en cours sur la filière prairies→lait→fromage. Elle permet de montrer toute la richesse du couplage entre le code radioécologique ASTRAL et un modèle agronomique de culture comme STICS (Brisson et al., 1998 ; Brisson et al., 2003). STICS (Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de fonctionnement des cultures développé par l'INRA depuis 1996. Son principal objectif est de simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole. À partir de la caractérisation du climat, du sol, de l'espèce cultivée et des techniques culturales appliquées, le modèle STICS calcule des variables de sortie relatives à la production. Ce couplage permet, pour certains paramètres radioécologiques ou contextuels, de remplacer les valeurs génériques utilisées par défaut dans le modèle ASTRAL par des valeurs adaptées aux caractéristiques agricoles régionales calculées par le modèle STICS (figure 1).

Figure 1: Comparaison des valeurs de transfert direct du dépôt à l'herbe de pâture (Ft_{dry}) du modèle radioécologique ASTRAL aux données régionalisées issues du modèle agronomique STICS (Durand et al., 2007a).



A la suite de chacune des études réalisées ces dernières années, une tabulation opérationnelle des paramètres d'ASTRAL a pu être proposée. Cette nouvelle tabulation permet de calculer l'ampleur d'une émission atmosphérique accidentelle de radioactivité qui prend en compte les variabilités régionales.

Conclusion

La prise en compte de données récentes et les plus réalistes possibles concernant les pratiques culturales en France est un axe de travail important car, d'une part, il est évident qu'une amélioration de la prédiction post-accidentelle est fondamentale pour diminuer les incertitudes paramétriques, et d'autre part, l'amélioration des pratiques de gestion des conséquences d'une pollution radioactive repose en partie sur la crédibilité du dialogue technique entre les experts institutionnels et les professionnels du monde agricole et agro-alimentaire. D'autres études sont envisagées pour l'année 2007: les légumes - racines avec l'exemple de la pomme de terre, le riz et le maïs grain.

Ces diverses études montrent toute la richesse du couplage entre les paramètres radioécologiques comme le rapport de captation et les paramètres agronomiques comme l'indice foliaire ainsi que l'intérêt de

l'utilisation du logiciel agronomique STICS. Ce couplage permet de confronter les valeurs de paramètres génériques utilisées dans ASTRAL aux valeurs issues de STICS en prenant en compte certaines sources

régionales de variabilité : climat, type de sol, système de culture et constitue donc une voie d'amélioration de la connaissance des paramètres utilisés en radioécologie.

Références

- Brisson N., Gary C., Justes E., Mary B., Roche R., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y. M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J. P., Maraux F., Seguin F. B., Sinoquet H., (2003) An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18: 309-332.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plénet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M. & Delécolle 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: 311-346.
- Durand V., Mercat-Rommens C., Curmi P., Benoit M., and Briand B., (2007) (a) Modelling Regional Impacts of Radioactive Pollution on Permanent Grassland. *Journal of Agronomy*, 6 (1) :11-20.
- Durand V., Briand B. et Mercat-Rommens C., (2007) (b) Simulations avec le modèle agronomique STICS pour l'étude de la culture de la laitue – Projet SENSIB. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2006-48.
- De Tourdonnet S., (1998) Maîtrise de la qualité et de la pollution nitrique en production de laitue sous abri plastique : diagnostic et modélisation des effets des systèmes de cultures. Thèse Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 192p.
- Levain A., Mercat-Rommens C. et Roussel-Debet S., (2006) Etude de la sensibilité de la vigne à une pollution radioactive accidentelle. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2006-54.
- Mercat-Rommens C., Roussel-Debet S., Briand B., Durand V., Besson B. et Renaud P., (2007) La sensibilité radioécologique des territoires : vers un outil opérationnel – le projet SENSIB. *Radioprotection* (sous presse).
- Mercat-Rommens C., Métivier J., Briand B. et Durand V., (2006) How geostatistics can help in predicting the level of radioactive contamination of cereals. 6th European Conference of Geostatistics for Environmental Applications, 25-27 October 2006, Rhodes, Grèce.
- Mercat-Rommens C. et Renaud P., (2005) >From radioecological sensitivity to risk management: the SENSIB Project. Second International Conference Radioactivity in the Environment, Nice, October 2005.
- Mourlon C. et Calmon P., (2002) ASTRAL: a code for assessing situations after a nuclear accident. 12th annual meeting of SETAC Europe, Vienna, 12-16 May 2002. Site internet : ASTRAL : <https://www.irsn-astral.org>.
- Müller H. et Pröhl G., (1993) ECOSYS-87: a dynamic Model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Physics*, 64, (3): 232-252.

Remerciements

Le projet SENSIB bénéficie du soutien financier de l'ADEME (convention n°0472C0035).

Remerciements tous particuliers pour Nadine Brisson, Marie Launay et Dominique Ripoche du groupe STICS pour leur constante disponibilité et leur précieuse aide dans la compréhension du logiciel STICS.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué à la réussite de ces études : Françoise Ruget, Stéphane de Tourdonnet et bien d'autres.

COUPLER STICS AVEC UN MODELE ECONOMIQUE POUR ESTIMER LES EMISSIONS DE N₂O ET L'IMPACT DE MESURES DE REDUCTION DES GAZ A EFFET DE SERRE

COUPLING STICS WITH AN ECONOMIC MODEL TO ASSESS N₂O EMISSIONS FROM CROPLAND AND THE EFFECTS OF MITIGATION MEASURES ON GHG EMISSIONS

S. Durandeau*, B. Gabrielle, C. Godard, P.A. Jayet, C. Lebas
INRA, UMR 210 Economie Publique, INRA INA P-G, F-78850 Thiverval-Grignon
[*sdurandeau@grignon.inra.fr](mailto:sdurandeau@grignon.inra.fr)

Introduction

En 2004, la quantité de protoxyde d'azote (N₂O) dans l'atmosphère était de 319,2 ppb, cette quantité a augmenté de 0,74 ppb par an au cours des 10 dernières années (source WMO). Le N₂O est un puissant gaz à effet de serre (GES), puisque, par kg, il a 296 fois le pouvoir de réchauffement global du dioxyde de carbone (source GIEC). Après le CO₂ et le méthane, le N₂O est le troisième gaz qui contribue le plus à l'effet de serre. Le N₂O est naturellement émis par les sols et les océans, mais les activités humaines correspondent à un tiers des émissions de N₂O. L'agriculture en particulier est la première source anthropogénique de N₂O, avec l'utilisation des sols et l'apport de fertilisants azotés.

Pour inventorier les émissions de GES, on utilise généralement la méthodologie préconisée par le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) - et en particulier pour les émissions agricoles de N₂O. Cependant, cette méthode est assez peu précise quand on l'applique à l'échelle régionale puisqu'elle ne prend pas en compte les effets de l'environnement local (sol, climat, et conduite des cultures). Cette étude propose une méthodologie alternative pour estimer les émissions de N₂O grâce au couplage d'un modèle de culture et d'un modèle micro-économique.

Matériels et méthodes

Les modèles utilisés

Les émissions de N₂O ont lieu dans le sol lors de la dénitrification et de la nitrification. La figure 1 présente schématiquement le processus d'émission de N₂O par les sols agricoles décrit par Hénault et al. (2005). On considère par la suite que le N₂O produit pendant la nitrification est négligeable devant celui de la dénitrification.

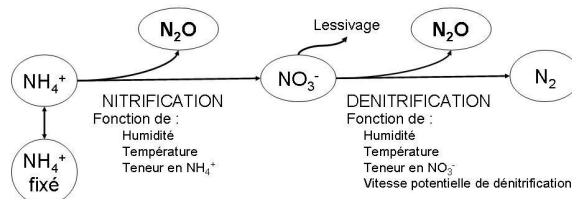


Figure 1 : Schéma des processus de nitrification et de dénitrification.

Le modèle de culture STICS (version 5.2) est utilisé pour prendre en compte les conditions environnementales locales (sol, climat, technique culturale) dans l'estimation des émissions de N₂O par les sols agricoles. Un module de dénitrification peut être activé (il modélise la dénitrification pour chaque couche élémentaire de sols, jour après jour), on fixe la vitesse potentielle de dénitrification à 8,0 kg N/ha/jour et la profondeur de dénitrification à 20 cm. On considère que la quantité de N₂O émise correspond à 20% de la quantité totale d'azote dénitrifiée (Hénault et al., 2005).

Le modèle économique d'offre agricole européenne AROPAj se base sur les données du Réseau d'Informations Comptables Agricoles (RICA). Il simule le fonctionnement économique de "fermes-types" statistiquement représentatives d'exploitations réelles. Son utilisation permet d'étendre à l'échelle des fermes-types ou de la région, les résultats "locaux" relatifs au N₂O. AROPAj permet également d'étudier l'impact de mesures de réduction des émissions agricoles de GES (De Cara et Jayet, 2000, 2005).

Les cas de simulations avec les modèles de culture

Selon la méthodologie établie par Godard (2005), les courbes de réponse du rendement à l'azote sont sélectionnées pour la région Picardie et l'année de récolte 1997 pour la culture d'intérêt. On obtient des combinaisons de différentes caractéristiques de sols, de climats, et de conduites de culture qui constituent nos cas d'étude (voir tableau 1).

Les courbes de réponses des émissions de N₂O en fonction de la dose d'engrais azoté apportée

sont construites pour ces combinaisons. Elles sont ensuite décrites avec une fonction linéaire.

Les simulations avec AROPAj

Les pentes de ces fonctions sont introduites dans le modèle AROPAj en tant que nouveaux facteurs d'émission indexés par la culture et la ferme-type. Pour constater l'impact des différentes méthodes de mesure et étudier l'effet de mesures de réduction des GES, différentes simulations sont réalisées avec ce modèle. Les rendements sont estimés soit de façon exogène (noté EXOG) avec les données directes du RICA, soit de façon endogène (noté ENDOG) avec l'introduction des fonctions de réponse du rendement à l'azote (Godard, 2005). Les émissions de N₂O sont estimées soit avec le facteur du GIEC correspondant à 1,25% de l'apport d'azote, soit avec les facteurs d'émission estimés avec STICS.

Deux mesures différentes de réduction des émissions de GES d'origine agricole sont étudiées avec AROPAj : une taxe de premier rang sur les émissions de GES, et une taxe de second rang sur les facteurs présumés responsables des émissions de GES (les animaux pour le méthane et les engrais azotés pour le N₂O).

Résultats

Les courbes de réponses à l'azote des émissions de N₂O et les facteurs d'émission

Les différents cas d'étude et les résultats des régressions linéaires effectuées sur les courbes de réponses à l'azote des émissions de N₂O sont présentés dans le tableau 1. Les pentes des régressions linéaires sont comprises entre 0,25% et 5,6% selon les cas, alors que la méthode par défaut du GIEC prend en compte un facteur d'émission fixé à 1,25%. Ces valeurs sont également plus élevées (d'un facteur 2 à 10) que celles obtenues avec un autre modèle de culture, CERES-EGC, qui a été recalé sur des observations expérimentales (Durandea et al., 2007). Les ordonnées à l'origine sont très variables en fonction des cas avec des valeurs qui peuvent être très élevées pour le colza notamment. Cependant AROPAj ne prend pas en compte les émissions naturelles du sol, donc ces coefficients "b" ne sont pas utilisés dans la suite de l'étude. On constate que les coefficients de détermination (R²) sont très proches de 1, le modèle linéaire semble donc bien adapté à la description de ces fonctions de réponse.

Culture	Ferme-type	Précédent	Sol	Précocité	Date de semis	Fonction de réponse des émissions de N ₂ O à l'apport d'engrais azoté N ₂ O _{émis} = a x DoseN + b		
						a (en %)	b	R ²
Blé dur	8	Pois	1792	Précoce	15-oct-96	1,51	6,63	0,97
	9	Pois	1969	Tardif	15-oct-96	3,75	12,97	0,99
Blé tendre	8, 10 et 11	Pois	1042	Précoce	15-oct-96	2,00	10,75	0,99
	9	Pois	1974	Tardif	15-oct-96	4,34	13,24	0,99
Betterave	8, 9, 10 et 11	Blé	1974	Moyen	1 ^{er} -avr-97	4,19	5,60	0,97
Colza	8	Pois	1042	Moyen	30-aout-96	1,40	11,38	0,97
	9 et 10	Pois	1974	Moyen	30-aout-96	4,66	36,17	1,00
	11	Blé	1974	Moyen	27-aout-96	4,01	37,94	0,99
Maïs	8 et 10	Blé	1969	Précoce	5-mai-97	5,34	10,11	0,99
	9	Pois	1974	Tardif	5-mai-97	5,60	13,95	0,99
Orge d'hiver	9	Blé	1792	Moyen	31-oct-96	0,69	2,01	0,96
	10	Pois	1974	Moyen	31-oct-96	2,28	9,27	0,93
Orge de printemps	8	Blé	1042	Moyen	15-mar-97	0,52	1,84	0,94
	11	Pois	1974	Moyen	13-mar-97	1,44	8,99	0,90
Pomme de terre	8, 9 et 10	Blé	1974	Moyen	10-mai-97	4,76	7,96	0,98
Tournesol	8	Pois	1969	Moyen	25-avr-97	1,36	8,66	0,81
	9	Pois	1820	Moyen	25-avr-97	0,25	1,57	0,83

Tableau 1 : Cas d'étude et fonctions de réponse à l'azote des émissions de N₂O

Définition des sols (classification FAO) : 1042 = Fluvisol eutrique ; 1974 = Cambisol calcaro-eutrique ; 1792 = Cambisol calcique ; 1969 = Luvisol orthique ; 1820 = Rendzine orthique

Définition des fermes-types : 8 = Expl. spécialisées céréales et oléo-protéagineux ; 9 = Expl. à cultures générales ; 10 = Expl. de polyculture et expl. mixtes grandes cultures/herbivores ; 11 = Expl. d'élevage ou exploitations mixtes.

Introduction des facteurs d'émissions dans AROPAj

Le tableau 2 présente les résultats des simulations AROPAj pour la région Picardie (sans mesure de réduction de GES) concernant les émissions totales de GES, les émissions de N₂O et la marge brute totale des exploitations en fonction des hypothèses de simulation.

L'utilisation des facteurs d'émission issus de STICS par rapport aux estimations faites avec le facteur du GIEC a pour conséquence une augmentation de 90 à 140% de la quantité de N₂O émise, et une augmentation de 21 à 42% des émissions totales de GES. Par contre, la prise en compte des fonctions de réponse du rendement à l'apport azoté conduit à une réduction de 18 à 30% des émissions de GES et une augmentation de 6% de la marge brute des exploitations.

	GIEC-EXOG	GIEC-ENDOG	STICS-EXOG	STICS-ENDOG
Emissions totales de GES	4308 t-CO ₂ -eq	3529 t-CO ₂ -eq	6099 t-CO ₂ -eq	4287 t-CO ₂ -eq
effet endogénéisation		-18 %		-30 %
effet Stics			+ 42 %	+ 21 %
Emissions de N ₂ O	1280 t-CO ₂ -eq	840 t-CO ₂ -eq	3070 t-CO ₂ -eq	1598 t-CO ₂ -eq
effet endogénéisation		-34 %		-48 %
effet Stics			+ 140 %	+ 90 %
Marge brute totale des exploitations	1538 millions €	1624 millions €	1538 millions €	1624 millions €
effet endogénéisation		+ 6 %		+ 6 %
effet Stics			0	0

Tableau 2 : Effets de l'introduction des facteurs d'émission du N₂O

L'impact des mesures de réduction des GES

Taxe de premier rang sur les émissions de GES

Les résultats concernant l'effet de l'application d'une taxe de 1^{er} rang sont présentés dans les graphiques de la figure 2, et le tableau 3. Avec la taxe de premier rang, pour atteindre une cible fixée à 6% de réduction des émissions de GES, les différences entre les scénarios de simulations conduisent à des taxes allant de 7 à 35 €/t-CO₂-équivalent. L'écart est d'abord dû à la manière d'estimer les rendements : la réduction de GES est plus prononcée avec les rendements endogènes quand la taxe augmente.

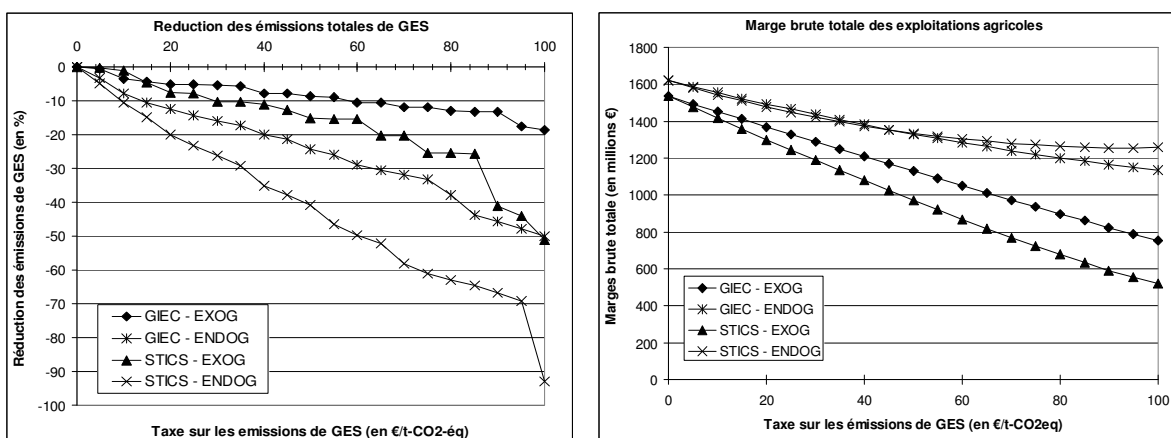


Figure 2 : Effet d'une taxe de premier rang sur les émissions et sur les marges brutes.

Cibles de réduction des émissions de GES	GIEC - EXOG	STICS - EXOG	GIEC - ENDOG	STICS - ENDOG
6 %	36 € / t-CO ₂ -eq	18 € / t-CO ₂ -eq	8 € / t-CO ₂ -eq	6 € / t-CO ₂ -eq
12 %	75 € / t-CO ₂ -eq	44 € / t-CO ₂ -eq	19 € / t-CO ₂ -eq	12 € / t-CO ₂ -eq

Tableau 3 : Taxes nécessaires (en €/t-CO₂-eq) pour atteindre des cibles de réduction de GES de 6 et 12 %

Taxe de second rang sur les facteurs présumés des émissions de GES

Avec la taxe de 2nd rang, on observe le même type de réponse en fonction des scénarios de simulation. Les rendements endogènes se traduisent par une meilleure réactivité du modèle économique vis-à-vis des changements de prix. La méthode de mesure influe donc sur la capacité à atteindre les cibles de réduction des émissions de GES. Les graphiques de la figure 3 présentent les jeux de taxes (taxe sur les UGB et taxe sur l'azote de l'engrais) compatibles avec les cibles de réduction.

Avec les facteurs d'émission issus de STICS et l'endogénéisation des rendements, les cibles de réduction sont atteintes pour des niveaux de taxe moins élevés qu'avec le facteur d'émission du GIEC. Par exemple, un abattement de 6% des émissions de GES et une taxe de 110€/UGB nécessitent une taxe 75 €/t d'engrais azoté pour le cas GIEC-ENDOG, et une taxe 60 €/t d'engrais azoté pour le cas STICS-ENDOG.

Pour atteindre une même cible de réduction, les taxes de second rang sur les UGB et sur les engrais azotés, si on les ramène en €/t-CO₂-équivalent, sont plus élevées que les taxes de premier rang.

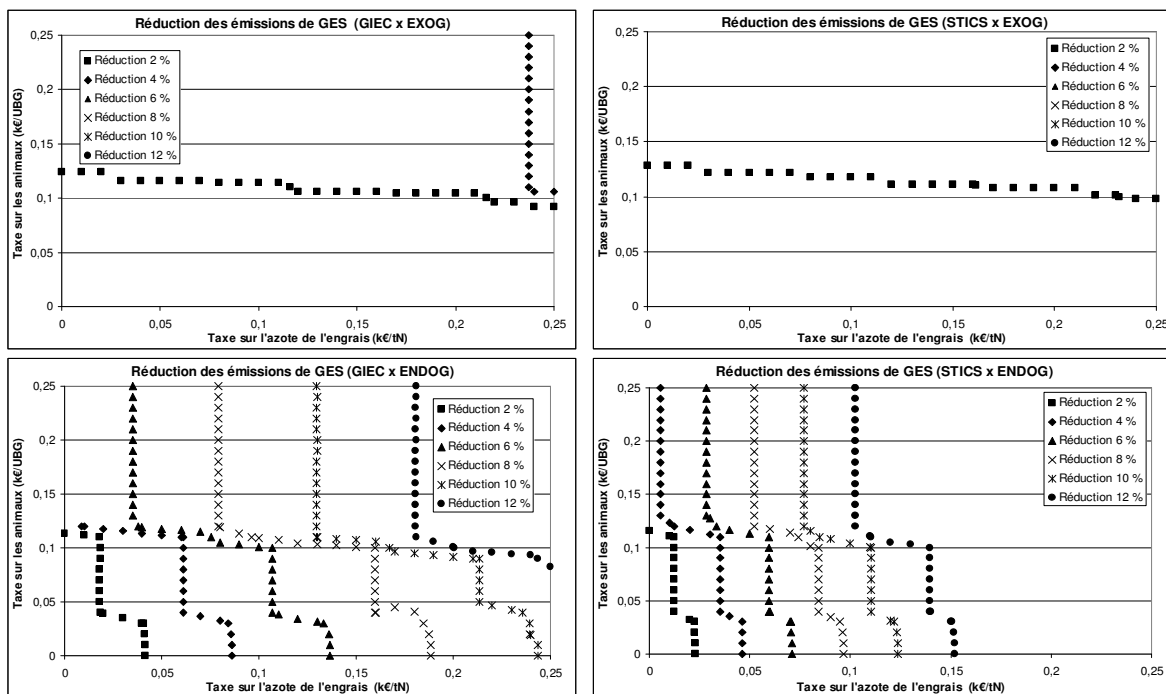


Figure 3 : Jeux de taxes de 2nd rang nécessaires pour atteindre différentes cibles de réduction des GES.

Conclusion

Cette étude présente une méthode alternative d'estimation des émissions de N₂O à l'échelle d'une région, et les conséquences de l'utilisation de cette méthode dans la modélisation économique.

Les différentes variantes de simulation dans le modèle économique (rendements exogènes ou endogènes - facteurs d'émission du GIEC ou de STICS) ont une influence marquée sur la réponse du modèle économique aux taxes, et donc, sur les conclusions que l'on peut tirer sur l'efficacité de mesures de réduction. L'estimation des rendements avec les fonctions de réponses à l'azote permet un lien plus étroit entre les prix et le comportement des agriculteurs, et apporte au modèle une meilleure réactivité. L'estimation des émissions de N₂O avec un modèle de culture apporte des précisions avec la prise en compte des effets du climat, du sol et de la conduite des cultures.

Cependant, la même méthode appliquée aux mêmes cas d'étude, en utilisant le modèle de culture CERES-EGC pour estimer les émissions de N₂O donne des résultats très différents avec des facteurs d'émission du N₂O allant de 0,1 à 2,25% (Durandea et al., 2007). Dans la suite du travail présenté ici, il apparaît indispensable de soumettre STICS à des tests sur des campagnes de mesures expérimentales des flux de N₂O, comme cela a été le cas avec CERES-EGC (Hénault et al., 2005). Ces tests fourniront l'occasion de déterminer plus précisément ce qui crée ces différences entre les modèles de cultures.

Références

- De Cara S. et Jayet P. (2000) Emissions of Greenhouse Gases from agriculture: the heterogeneity of abatement costs in France, *European Review of Agricultural Economics*, 27: 281-303.
- De Cara S., Houzé M., Jayet P.A. (2005) Greenhouse gas emissions from agriculture in the EU: a spatial assessment of sources and abatement costs, *Environmental And Resource Economics*, 32 (4): 551-583.
- Durandea S., Godard C., Gabrielle B., Jayet P-A. et Lebas C. (2007) Coupling biophysical and micro-economical models to assess nitrous oxide emissions from cropland and the effects of mitigation measures on greenhouse emissions. (soumis à Climatic Change en janvier 2007)
- 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. Thèse de doctorat en Agronomie (Sous la direction de Roger-Estrade, J.) INRA-INA PG, UMR Economie publique, - 278 p.
- Hénault C., Bizouard F., Laville P., Gabrielle B., Nicoulaud B., Germon J. et Cellier P. (2005) Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database, *Global Change Biology*, 11: 115-127.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au financement du projet de recherche européen GENEDEC (FP6-502184).

COUPLAGE DU MODELE STICS ET DE DONNEES DE TELEDETECTION OPTIQUE POUR LA DETERMINATION DES PRATIQUES CULTURALES EN REGION DES ALPILLES

SPATIALIZATION OF SOWING DATE AND NITROGEN SUPPLIES BY COMBINING REMOTE SENSED LEAF AREA INDEX AND A CROP SIMULATION MODEL. THE CASE OF DURUM WHEAT IN THE ALPILLES TEST AREA (SOUTH-EAST OF FRANCE)

R. Hadria*, A. Oliosio, B. Duchemin, F. Ruget, M. Weiss, V. Rivalland, M. Guérif, A. Lahrouni,
P. Lecharpentier

CESBIO – Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, Toulouse - France

*rachid.hadria@cesbio.cnrs.fr

Introduction

Les modèles de culture représentent les interactions entre le sol, la plante et l'atmosphère afin : 1) de prévoir la production de phytomasse et sa répartition dans les différents organes de la plante et notamment dans les grains; 2) de simuler la réponse d'une culture à des stress environnementaux (ex sécheresse) ou à des parcours agronomiques variés. Leur application à une échelle régionale permettrait d'apporter des éléments de réponse à certaines questions que se posent les gestionnaires agricoles et environnementaux. La télédétection permet d'estimer la variation spatiale et temporelle de certaines variables biophysiques clefs du systèmes sol-plante (Moulin et al. 1998, Kite and Droogers 2000). Différentes techniques ont été développées pour contrôler les modèles à partir de ces estimations : forçage, calibration, assimilation séquentielle ou variationnelle (Oliosio et al. 1999, Weiss et al. 2001, Pellenq and Boulet 2004). Cependant, l'absence de certaines données d'entrées des modèles est une limite à leur utilisation opérationnelle (Guérif and Duke 1998, Moulin and Guérif 1999). Ce problème est particulièrement critique en ce qui concerne les itinéraires techniques (semis, fertilisation, irrigation), qui ne peuvent être déterminés précisément lors d'études régionales. Ce travail s'inscrit dans cette démarche générale, qui est testée spécifiquement à partir du modèle STICS et des estimations de l'indice foliaire de parcelles de blé dur par télédétection réalisées sur la petite région agricole des Alpilles.

L'expérience Alpilles-ReSeDA

L'expérience Alpilles-ReSeDA a été réalisée dans les Alpilles, à une vingtaine de kilomètres au sud d'Avignon (sud-est de la France) entre octobre 1996 et novembre 1997. L'objectif général de cette expérience était de développer des méthodes d'assimilation de données de télédétection multi longueur d'onde et multi temporelle dans les modèles de cultures et de transfert sol-végétation-atmosphère (Prévoit et al., 1998). L'expérience a permis de collecter des observations de terrain sur le sol et la végétation, ainsi que des données de télédétection aéroportées et satellitaires pour des cultures d'hiver et d'été (Oliosio et al. 2002). La région test d'Alpilles-ReSeDA couvrait une surface de 20 km² (4x5km²) cultivée en blé (30%), tournesol (20%), verger (15%), maraîchage et fourrage.

Pour cette étude, nous avons utilisé les mesures collectées sur 6 parcelles de blé. Les propriétés hydrodynamiques du sol ont permis d'estimer les points de flétrissement et de capacité au champ. L'indice foliaire (LAI) et la phytomasse aérienne ont été mesurés une fois par semaine par des mesures destructives. Les données climatiques ont été acquises par une station météorologique installée au centre de la région test. Les informations sur les pratiques agricoles ont été collectées pour chacune des 6 parcelles d'étude ainsi qu'au niveau de 6 exploitations (24 parcelles qui n'ont pu être localisées précisément).

En ce qui concerne les données de télédétection, nous avons utilisé les données acquises par le radiomètre multi angulaire POLDER (visible et proche infrarouge). Ces données ayant une résolution spatiale de 20 m ont été obtenues par des vols avion réalisés à 16 dates différentes. Une description détaillée des données et de leur traitement est donnée par Jacob et al. (2002a,b). L'application à ces données d'un algorithme d'inversion de type réseau de neurones développé par Weiss et al. (2002) a permis d'établir des cartes d'indice foliaire. L'apprentissage de cet algorithme est réalisé à partir d'une base de données simulées en utilisant un modèle de transfert radiatif combinant SAIL pour la canopée (Verhoef, 1984) et PROSPECT pour la feuille (Jacquemoud and Baret, 1990). Les erreurs (rmse) sur le LAI ont été estimées à 0.44 par comparaison aux mesures de terrain.

Méthodologie

La méthodologie adoptée pour cette étude comprend 3 étapes : A- le modèle STICS est calibré et validé à partir des données de terrain; B- le modèle est mis en œuvre pour de nombreux scénarii d'itinéraires techniques (semis, fertilisation et irrigation) C- les LAI simulés par STICS sont comparés au LAI estimés par télédétection dans le but de retenir les scénarii plausibles.

A- Le modèle est tout d'abord calibré sur une parcelle de référence ("*plot 120*" dans Olioso et al., 2002) en jouant sur les paramètres de phénologie (seuils de températures cumulées) pour ajuster la trajectoire du LAI. STICS simule alors correctement la production de biomasse aérienne, sans ajustement supplémentaire. Dans un deuxième temps et avec cette calibration, STICS est appliqué aux autres parcelles d'étude (plots 101, 208, 210, 214 et 300). Les simulations de LAI et de biomasse sont comparées aux observations de terrain.

B- Un nombre important de simulations est réalisé (figure 1) en changeant les dates de semis ainsi que les calendriers d'irrigation et de fertilisation (dates et quantités). Ces parcours ont été sélectionnés sur la base des pratiques agricoles observées dans la région des Alpilles : 14 cas de semis sont envisagés entre le 14 octobre et le 14 février (tous les 10 jours) ; pour la nutrition azotée, 7 cas de reliquats initiaux de NO₃ dans le sol et 5 calendriers de fertilisation sont considérés, de 0 à 4 apports pour la saison de culture avec des quantités variant entre 40 et 120 kg N/ha ; 3 schémas d'irrigation ont été retenus : aucun apport ou apport de 100 mm début mars ou début avril (exceptionnellement observé dans la région pour l'année considérée en raison du caractère sec de celle-ci).

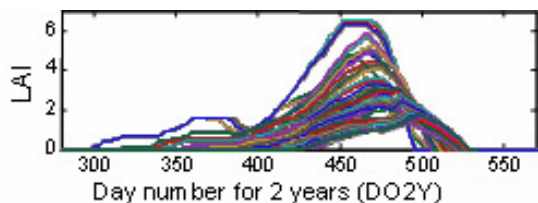


Figure 1. Exemples de courbes d'évolution du LAI pour un grand nombre de scénarii agricole. DO2Y représente le numéro de jour sur deux années

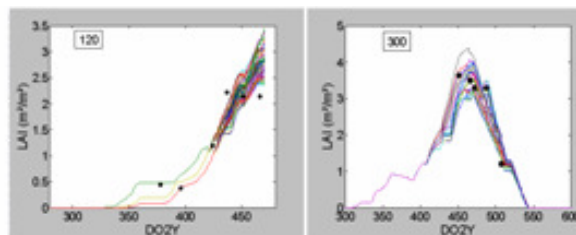


Figure 2. Exemple de profils de LAI simulés (traits continus) et observés (points) pour deux parcelles d'étude.

C- Les séries d'indice foliaire simulé sont comparées aux inversions issues des données de télédétection dans le but de retenir les cas où les différences entre observations et simulations sont les plus faibles. Ces cas doivent correspondre aux scénarii les plus probables de pratiques agricoles (semis, fertilisation, irrigation) appliquées aux cultures de blé dans la région des Alpilles. Ceci nous permet d'établir des cartes ou des indicateurs des pratiques, qui sont comparées aux observations de terrain au niveau de la parcelle et de l'exploitation.

Les dates de semis sont obtenues préalablement en comparant les six premières images de télédétection acquises pendant la phase végétative. Sur cette période les simulations de LAI sont plus sensibles aux dates de semis qu'au calendrier de fertilisation et d'irrigation. Les scénarii sont retenus si l'erreur (rmse) entre observation et simulation est inférieure à 0.2. Pour le calendrier de fertilisation, nous utilisons la même approche mais en utilisant cette fois l'indice de surface de la plante (PAI, cf. Weiss et al., 2002, Hadria et al., 2006b) sur une période différente allant de la fin de la phase végétative au début de la sénescence. Nous n'avons pas étudié l'influence spécifique de l'irrigation. La Figure 2 montre un exemple de profils de LAI simulés et observés pour deux parcelles d'étude.

Calibration et validation de STICS

La figure 3 permet de comparer les simulations et les observations d'indice foliaire et de biomasse obtenues sur la parcelle de référence et sur une parcelle de validation. Il y a un bon accord entre valeurs simulées et observées, avec toutefois une légère surestimation de la phytomasse aérienne en fin de saison pour la parcelle de validation. Le tableau 1 donne les statistiques associées à l'erreur entre observation et simulation sur chacune des 6 parcelles d'étude. Il confirme globalement le bon comportement du modèle. Erreurs (rmse) et biais affichent, en moyenne pour les 6 parcelles, des valeurs respectives de 0.26 et -0.04 m² m⁻² pour le LAI, 1.99 et -1.21 t ha⁻¹ pour la phytomasse aérienne. Les valeurs maximales de l'erreur sont d'environ 0.7 m² m⁻² pour le LAI et 2.5 t ha⁻¹ pour la phytomasse aérienne. Ces statistiques sont comparables à celles de nos travaux antérieurs dans les régions semi-arides de Marrakech (Hadria et al. 2006a) et de Yaqui (Rodriguez et al., 2004).

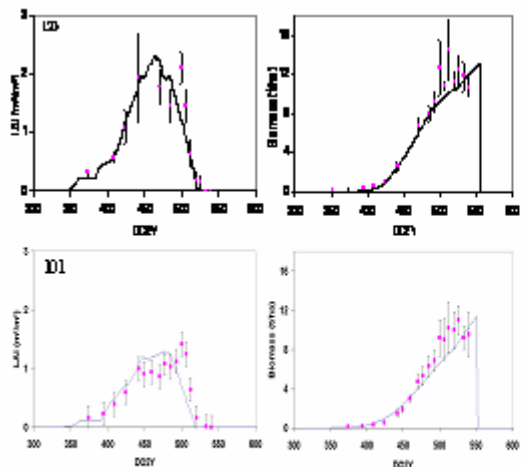


Figure 3. Les LAI et les biomasses simulés (lignes) et observés (carreaux) pour la parcelle de référence (120) et une autre parcelle de validation (101).

Table 1. Statistiques entre LAI et les biomasses simulés et observés (la parcelle 120 a été utilisée pour calibrer STICS et les autres pour le valider).

Plot	LAI (m ² /m ²)			Biomass (t/ha)		
	max	RMSE	Bias	max	RMSE	Bias
120	2,10	0,26	-0,04	14,56	1,99	-1,21
101	1,42	0,24	0,10	10,99	1,28	-0,67
208	1,97	0,23	0,03	13,38	1,49	1,06
210	2,66	0,73	-0,45	15,40	2,48	-1,85
214	1,08	0,63	0,51	7,31	0,75	0,37
300	2,78	0,55	0,11	13,58	1,92	-1,25

Table 2. Comparaison entre les dates de semis (SD) estimées et observées pour les six parcelles étudiées. Les dates sont données en numéro du jour sur deux années (DO2Y).

Fieldnumber	101	120	208	210	214	300
Obs. SD	312	323	297	305	409	315
Est. SD	312	312	308	308	410	308

Inversion des dates de semis

Le tableau 2 permet d'évaluer les dates de semis inversées (dates dominantes parmi les scénari retenus) sur les 6 parcelles d'étude. Ces dates concordent avec les dates de semis réelles, avec une erreur (rmse) de 7 jours qui est inférieure au pas de temps utilisé entre deux dates de semis successifs. Ce bon résultat est confirmé par la comparaison réalisée à l'échelle de l'exploitation (tableau 3). La carte des dates de semis finalement dressée est présentée en Figure 4. Nous observons sur cette carte qu'il y a deux périodes de semis distinctes, la première entre la mi-octobre et fin-novembre, et la seconde entre fin décembre et le mi février. Ces périodes correspondent aux types de cultures pratiquées dans la région des Alpilles (blé d'hiver et de printemps).

Table 3. Comparaison entre les dates de semis simulées et celles réalisées à l'échelle de l'exploitation

Farm level	Stated SD	Est. SD
1 (3 fields)	End of Oct. or Feb.	Oct. 30, Oct. 30, Oct. 30
2 (4 fields)	Oct. 26 to 31	Oct. 30, Oct. 30, Oct. 30, Nov. 8
3 (5 fields)	End of Oct.	Oct. 30, Oct. 30, Oct. 30, Oct. 30, Nov. 8
4 (3 fields)	Beginning of Dec. or end of Jan.	Nov. 18, Jan. 25, Feb. 4
5 (3 fields)	Nov. 4 and 5	Nov. 8, Nov. 28, Feb. 14
6 (6 fields)	End of Oct. to beginning of Dec.	Oct. 20, Oct. 20, Oct. 20, Oct. 30, Nov. 8, Nov. 8

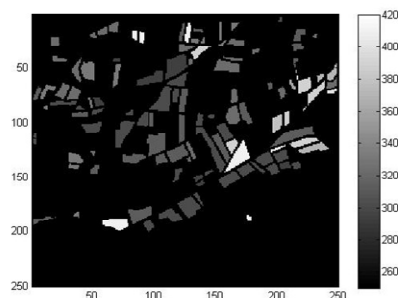


Figure 4. Carte de dates de semis simulées pour la région des Alpilles.

Éléments de réponse sur les pratiques de fertilisation

Les conclusions concernant les calendriers de fertilisation sont moins évidentes (table 4). Les erreurs relatives entre les quantités inversées et celles appliquées par les exploitants varient entre 25% (plot 101) et 113% (plot 300), avec une moyenne de l'ordre de 50 kg ha⁻¹. Il y a une surestimation des apports dans 5 cas sur 6 (plot 214). Deux explications peuvent être avancées: 1) il y a une surestimation de l'indice PAI de telle sorte que le modèle a tendance à augmenter les apports pour rendre compte de valeurs anormalement élevées; 2) les scénari utilisés présentent certaines limites, en particulier les quantités appliquées sont fixes d'une date à l'autre, ce qui n'est pas le cas en réalité. De plus, il y a très probablement certaines compensations au niveau de la réponse du modèle pour les différentes combinaisons de pratiques agricoles (semis, fertilisation et irrigation). Sur la base des seules observations disponibles (indices de surface dérivés de données optiques), le problème posé est donc sous-déterminé.

Tableau 4 : Comparaison entre les quantités d'azote observées et celles simulées

Plot	Stated quantity (kg/ha)	Simulated quantity (kg/ha)
101	176.0	221.0
208	182.4	290.0
210	284.0	370.0
214	83.0	50.0
300	182.4	390.0

Conclusion

Dans cette étude, nous avons essayé de développer une méthode, basée sur le couplage de la modélisation et des données de télédétection, qui permet d'estimer certains paramètres culturaux (date de semis, dose de fertilisant azoté) par inversion. Les résultats obtenus s'avèrent très encourageants pour la date de semis, avec une erreur inférieure à une semaine. La méthode développée permet d'obtenir une carte précise des dates de semis dans la zone d'étude. Pour la fertilisation, les doses d'apport sont généralement surestimées et la méthode a besoin d'être améliorée. Il serait intéressant d'étudier d'autres variables biophysiques en complément des indices de surfaces LAI et PAI utilisés dans cette étude.

L'irrigation n'a pas été prise en compte ici car, en général, l'eau n'est pas le facteur limitant pour la culture de blé dans la région des Alpilles. Cependant, un stress sévère a eu lieu durant l'année d'étude et certaines parcelles ont été irriguées. L'utilisation des données dans l'infra rouge thermique pourrait donner des informations supplémentaires sur l'irrigation, comme le montrent Olioso et al. (2005).

Références

- Brisson et al. (2003) An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, pp. 309–332.
- Duchemin B. et al. (2006) Monitoring wheat phenology and irrigation in center of Morocco : on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural and Water Management*, 79: 1-27.
- Guérif M. and Duke C. (2000) Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81: 57–69.
- Hadria R. et al. (2006a) Calibration and validation of the STICS crop model for managing wheat irrigation in the semi-arid Marrakech/Al Haouz Plain, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, special issue "Potential Water Challenges and Solutions in the New Millennium in Arid Regions". In press.
- Hadria R. et al. (2006b) Spatialization of sowing date and nitrogen supplies by combining remote sensed leaf area index and a crop simulation model. The case of durum wheat in the Alpilles test area (South-East of France). The 2nd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, 25-29 Sept. 2006, Valencia, Spain.
- Jacob F. et al. (2002a) Assessing the narrowband to broadband conversion to estimate visible, near infrared and shortwave apparent albedo from airborne PoLDER data, *Agronomie*, 22: 357-546.
- Jacob F. et al. (2002b) Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model, *Agronomie*, 22: 669-680.
- Jacquemoud S. and Baret F. (1990) PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote sensing of environment*, 34: 75-91.
- Kite G. W. and Droogers P. (2000) Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *Journal of Hydrology*, 209: 3–18.
- Moulin S. and Guérif M. (1999) Impact of model parameter uncertainties on crop reflectance estimates: a regional case study on wheat. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 213–218.
- Moulin, S., Bondeau, A. and Delécolle, R. (1998) Combining agricultural crop models and satellite observations from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1021–1036.
- Olioso et al. (2002) Monitoring energy and mass transfers during the Alpilles-ReSeDA experiment. *Agronomie*, 22: 597-610.
- Olioso A. et al. (1999) Estimation of Evapotranspiration and Photosynthesis by Assimilation of Remote Sensing Data into SVAT Models. *Remote Sensing of Environment*, 68: 341–356.
- Olioso A. et al. (2005) Future directions for advanced evapotranspiration modeling: assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems*, 19: 377-412.
- Pellenq J. and Boulet G. (2004) A methodology to test the pertinence of remote-sensing data assimilation into vegetation models for water and energy exchange at the land surface. *Agronomie*, 24: 197–204.
- Prévot L. et al. (1998) Assimilation of multi-sensor and multi-temporal remote sensing data to monitor vegetation and soil: the Alpilles-ReSeDA project. In IGARSS'98. 6-10 July 1998, Seattle, USA. IEEE Publications. CDROM: paper E04-03 or Volume 5, 2399-2401.
- Rodriguez J.C. et al. (2004) Wheat yield estimation using remote sensing and the STICS model in the semi-arid valley of Yaqui, Mexico. *Agronomie*, 24: 295–304.
- Verhoef W. (1984) Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model. *Rem. Sen. Environ.*, 16: 125-141.
- Weiss M. (2002) Evaluation of neural network techniques to estimate canopy biophysical variables from remote sensing data, *Agronomie*, 22: 547– 553.
- Weiss, M. et al. (2001) Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108: 113–128.

Acknowledgment

This study was conducted in INRA Avignon within the framework of the IRD/Sud-Med project, with support from the European Union 5th Framework through two INCO-MED Programmes: WATERMED (ICA3-CT-1999-00015 <http://www.uv.es/ucg/watermed>) and IRRIMED (<http://www.irrimed.org/>). Support for this research was provided by the AUF agency (Agence Universitaire de la Francophonie, www.auf.org).

THEME 5

CONSTRUCTION ET UTILISATION D'UN SYSTEME DE GESTION DE STICS

BUILDING AND USE OF A STICS MANAGEMENT SYSTEM

M. Launay, D. Delannoy, N. Brisson

INRA, Unité Agroclim, Domaine St Paul, Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex 9
mlaunay@avignon.inra.fr

Introduction

Depuis sa création en 1996, le modèle STICS (Brisson *et al.*, 2002) a été fortement enrichi. Ses versions successives que son implication dans divers projets de recherche et de développement a engendrées, ont donné lieu à l'ajout de nouveaux formalismes et au paramétrage du modèle pour de nouvelles plantes. Cependant, si le modèle et son paramétrage actuel reflètent le résultat de ces divers travaux, les données acquises et utilisées dans ce cadre sont aujourd'hui dispersées parmi les utilisateurs impliqués. Or, la robustesse de STICS n'est compatible avec son évolution constante, que si nous avons la possibilité d'évaluer et parfois même de revoir son paramétrage pour les différents sols, plantes et techniques susceptibles d'être simulés, à chaque fois que de nouveaux processus y sont introduits. Par conséquent, notre intention est de créer une base pour la centralisation et l'archivage de ces données, base qui sera utilisée ensuite pour l'évaluation de la qualité du paramétrage à chaque nouvelle version du modèle et pour la révision de ce paramétrage lorsque ce sera nécessaire. Elle pourra également être interrogée par les utilisateurs souhaitant extraire des situations de simulations « types ». Dans un premier temps cette base sera constituée des données utilisées pour le paramétrage des différentes cultures simulées par STICS, ainsi que de l'ensemble des situations de simulations de la base ARTIX (Godard, 2005) caractéristiques des systèmes de cultures d'Europe du Nord.

Constitution et utilisations de la base

Constitution de la base

La base contient d'une part des données dites « primaires » c'est-à-dire qui lui sont directement fournies telles quelles, et d'autre part des données « secondaires » élaborées par des outils externes à partir des données primaires (Fig.1).

- les données « primaires », décrivent soit des situations locales (expérimentations), soit des situations types (extraites d'une typologie de systèmes de cultures par exemple). Elles comprennent des fichiers d'entrée de STICS (fichiers USM, climat, sol, technique) et des métadonnées associées caractérisant qualitativement et quantitativement ces situations (situation géographique, conditions d'alimentation hydrique et azotée, type de sol et de climat, type d'exploitation agricole de référence, etc...). Aux situations de simulations locales sont associées des données expérimentales (fichiers de valeurs moyennes et écart-types des variables mesurées).

- les données « secondaires » sont obtenues par comparaison de variables simulées par le modèle avec des variables mesurées, sur un ensemble de situations locales choisies pour cette évaluation. Elles comprennent une description des situations utilisées (carte représentant les zones géographiques impliquées, position des sols dans le triangle de texture, caractéristiques climatiques, etc.), ainsi que les résultats de l'évaluation sous forme de critères statistiques calculés et de graphes de comparaison simulés/observés.

Cette base est donc en lien avec des outils externes, tels que le modèle STICS (plusieurs versions peuvent être exécutées afin de comparer la qualité de leurs simulations avec un paramétrage donné), une procédure automatique d'évaluation qui compare simulations et observations sur un ensemble d'USM préalablement identifiées, et une méthode de paramétrage qui peut être mise en œuvre lorsque les résultats de l'évaluation sont trop insatisfaisants (cette méthode n'est pas automatique et nécessite une collaboration entre l'équipe STICS et les experts concernés).

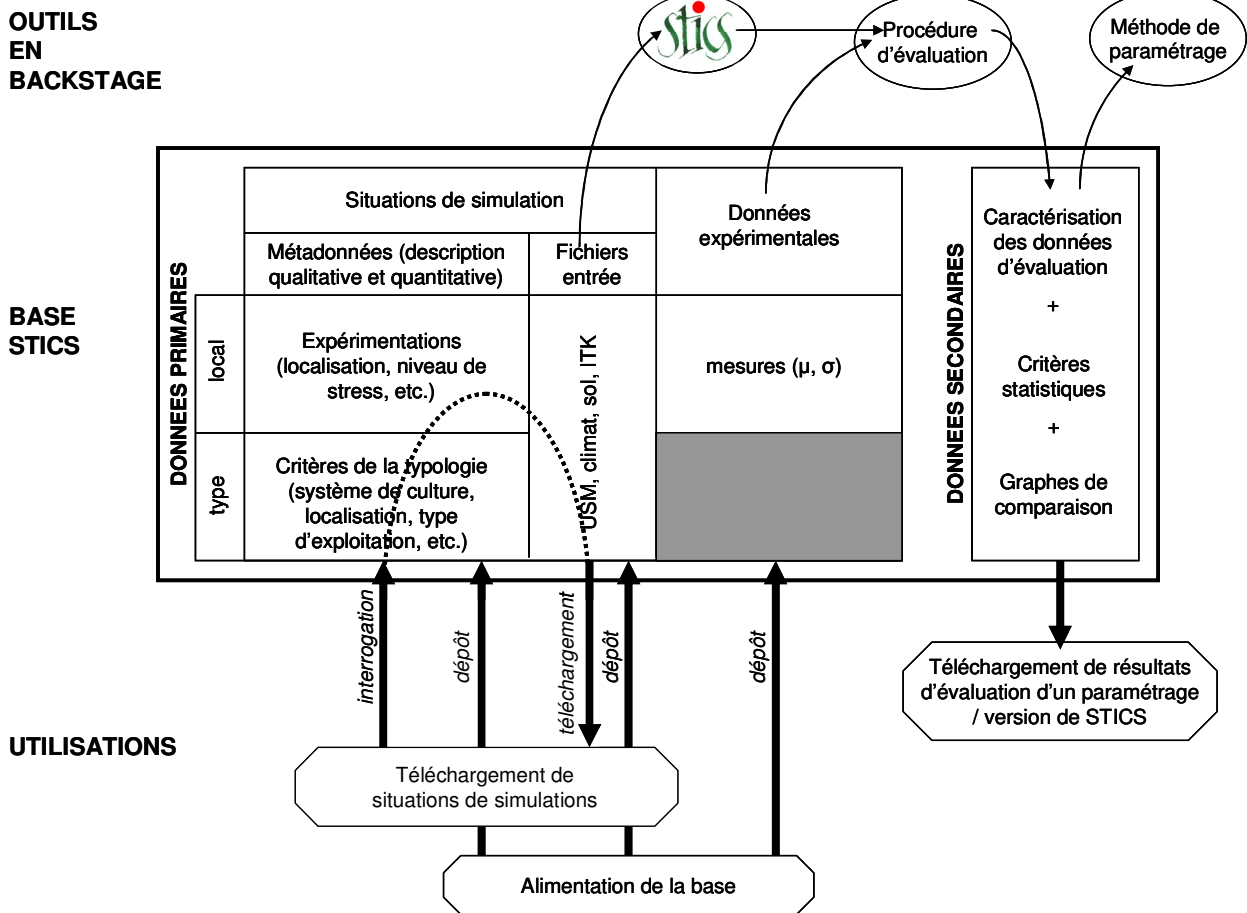


Figure 1 : Représentation de la base de données STICS et de ses modes d'utilisation.

Utilisation de la base

Une interface web permettra aux utilisateurs de (Fig. 1) :

- choisir des situations de simulations via une interrogation de la base sur les métadonnées, et de télécharger les fichiers d'entrée correspondant (les données expérimentales ne sont pas accessibles),
- alimenter la base avec leurs propres données, en fournissant leurs fichiers d'entrée, leurs données expérimentales, et en renseignant les métadonnées,
- connaître la qualité de prédiction du modèle pour une version et un paramétrage donné, ainsi que sa robustesse, en téléchargeant une description des données utilisées pour cette évaluation, les critères statistiques calculés et les graphes de comparaison simulés/observés.

Architecture informatique et accessibilité

Pour mettre en œuvre le système décrit ci-dessus, nous avons choisi de développer une application de type web accessible uniquement en Intranet. L'architecture a été pensée dans un souci de réutilisation des développements et de souplesse d'implémentation. En effet, le système est doté d'une architecture n-tiers dont les caractéristiques sont :

- ❖ Un client léger accessible en Intranet (Navigateur web)
- ❖ Une organisation en couches (présentation, métier et données)
- ❖ Un processus de développement unifié (basé sur UML)
- ❖ Le langage JAVA et les spécifications J2EE
- ❖ De nombreux framework
- ❖ Un système de gestion de base de données relationnelle, Postgres

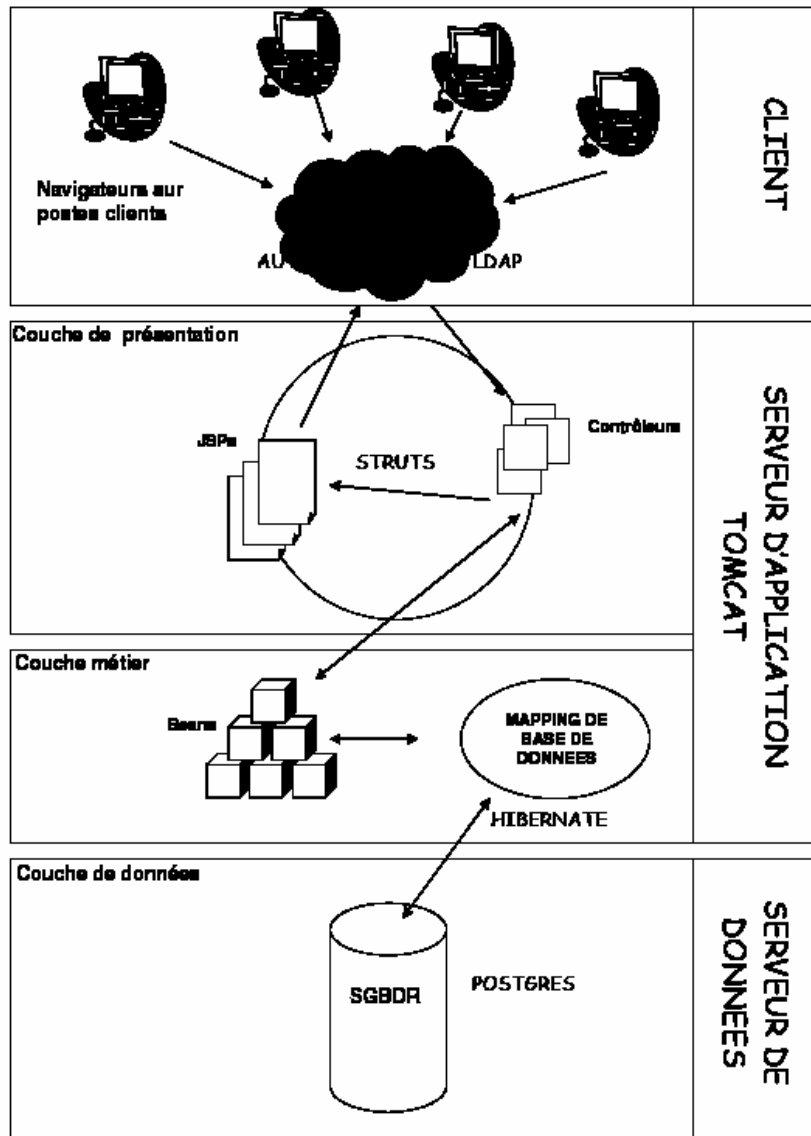


Figure 2 : Architecture technique de Système d'information d'évaluation des performances de STICS

Seuls les agents de l'INRA et certains partenaires identifiés auront accès à l'interface utilisateur par le biais de l'intranet ou de postes de travail autorisés. Une authentification LDAP sera nécessaire ; pour les partenaires externes, une procédure d'inscription aux annuaires de l'INRA sera mise en place.

Conclusion et perspectives

Cette base doit à court terme fournir de façon automatique une évaluation de la qualité du modèle à chacune de ses nouvelles versions. Grâce à la classification des données de paramétrage et d'évaluation via les métadonnées, les opérations de re-paramétrage seront simplifiées, et la mise à jour des valeurs de paramètres plus « réactive ». Enfin, l'alimentation de la base en conditions de simulations nouvelles participera à améliorer la robustesse du modèle. A moyen terme, la base pourrait également être utilisée pour assurer la traçabilité des paramétrages et des versions du modèle.

Références

- Brisson N. et al. (2002) An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18: 309-332.
 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. Thèse de doctorat de l'INA P-G, 226 p.

PROJET ANR-CLIMATOR

ELABORATION D'OUTILS ET DE REFERENCES POUR L'ANALYSE DE LA VULNERABILITE DES AGRO-ECOSYSTEMES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ANR-CLIMATOR PROJECT

ELABORATION OF TOOLS AND REFERENTIALS TO ANALYZE VULNARIBILITY OF AGRO ECOSYSTEMS CONFRONTED TO CLIMATE CHNAGE

N. Brisson *, **F. Huard***, **L. Terray****, **L. Guillioni*****, **D. Allard***, **J. Roger-Estrade******, **J.F. Soussana***, **V. Badeau***, **M. Martin***, **L. Huber***, **F. Bussière***, **F. Levrault*******, **J. L. Durand***, **P. Pieri***, **P. Gate*******, **A. Chanzy***, **M. Deque***, **G. Richard***, **J.E. Bergez***, **D. Lousteau*...**

* INRA, ** CERFACS, *** Agro M, **** INA-PG,***** AgroTransfert Poitou Charentes,***** ARVALIS
*INRA, Agroclim Site Agroparc, F-84914 Avignon (brisson@avignon.inra.fr)

Le projet CLIMATOR a pour objectif de fournir des méthodes, des outils et un référentiel sur l'impact du changement sur des agro-écosystèmes variés, dans des climats contrastés français, en termes de flux, d'état des systèmes, d'optimisation des pratiques en adéquation avec des cahiers des charges techniques. Il est constitué de 4 volets.

Le premier volet concerne les données climatiques et le développement d'outils permettant de régionaliser et sécuriser les scénarios issus des GCM (Terray et Braconnot, 2007). Cette composante climatique du projet sera abordée de façon stationnelle pour des climats variés mais non spatialisés (Figure 1), elle sera centrée sur le climat local, considérée comme la condition à la limite supérieure des écosystèmes cultivés. A partir des sorties du GCM Arpège, dont la résolution est de 60 km sur la France, plusieurs méthodes de régionalisation seront comparées. La méthode des anomalies (Huard, 2007), celle des corrections variables (Déqué, 2006) et celle des régimes de temps (Boe et al., 2007). Une autre méthode basée sur la caractérisation statistique des anomalies sera développée.

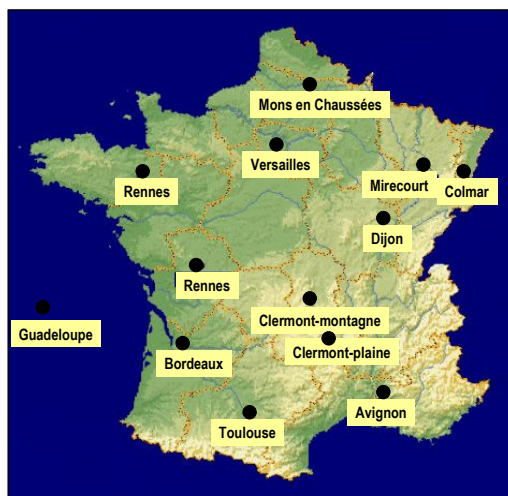


Figure 1 : Les sites retenus pour CLIMATOR

Les second et troisième volets sont dédiés aux problématiques agro-écologiques avec deux approches complémentaires, l'une systémique et l'autre mécaniste. Il s'agira de faire tourner des modèles éprouvés (Tableau 1), dont STICS, sur les sites climatiques choisis dans le cadre de protocoles de simulation pertinents, à l'échelle de la parcelle.

Dans le second volet nous proposons d'envisager l'avenir et la durabilité des systèmes sous l'angle à la fois technique (quels choix de systèmes et de pratiques ?) et écologique (quelle évolution à long terme des sols ? de la contribution de l'agriculture à l'effet de serre ? de l'évolution spontanée des forêts). Trois grands types de systèmes seront abordés : les systèmes de cultures en rotation comprenant éventuellement des pluriannuelles comme des prairies temporaires, les systèmes herbagers de prairie permanente pâturée et les systèmes forestiers monospécifiques. L'adéquation des choix techniques avec le nouveau contexte climatique sera analys e en trois étapes : 1) avec les systèmes et pratiques actuelles, 2) en optimisant les pratiques vis-à-vis d'un critère de production (conduite intensive) et 3) en imposant des contraintes techniques basées sur des

Modèle	Système / variable d'état / grande fonction simulés	Références
STICS	Systèmes de cultures annuelles y compris tropicales, prairies, vigne	Brisson et al., 2003 Sierra et al., 2003
MODERATO / MOUSTICS	Système culture irriguée	Bergez et al., 2001
CERES	Système herbacé	Travaso et al., 2002 ; Lebard, 2005
PASIM	Système herbager	Riedo et al., 1998
GRAECO	Système forestier	Lousteau et al., 2005
Evolution des forêts	Système forestier long terme	Badeau et al., 2005
PANORAMIX	Développement céréales	Gate, 1996
SISOL	Structure du sol	Roger-Estrade et al., 2000
SOILFLEX	Tassement du sol	Keller et al., 2006
TEC	Physique du sol	Chanzy et Bruckler, 1993
OTELLO	Organisation du travail	Papy et al., 1990
RothC	Carbone sol long terme	Martin et al., 2006
CENTURY	Carbone/azote sol long terme	Parton et al., 1987
PASTIS	Physique et biologie du sol	Garnier et al., 2003
ISBA-GS	Transferts sol-végétation-atmosphère	Calvet et al., 1998
DROP	Eau dans la végétation	Bussièrre et al. 2002
CUPID	Eau dans la végétation	Huber et al., 1998
TAPEX, TCAPIITULE	Température d'organes	Guilioni et al., 2000
BHV	Bilan hydrique vigne	Pieri et Gaudillère, 2003
BILJOU	Bilan hydrique forêt	Granier et al., 1999
Botrytis vigne	Risque phytosanitaire	Fernaude et al., 2003
CERES-Rouille brune blé	Risque-nuisibilité phytosanitaire	Robert et al., 2004
Phomopsis Tournesol	Risque phytosanitaire	Delos et al., 2000
PANORAMIX-Septoriose Blé	Risque Phytosanitaire	Brefuel, 2005

Tableau 1 : Liste des modèles utilisés dans CLIMATOR

Les travaux du troisième volet seront à l'échelle des mécanismes, centrés sur les fonctions de réponse dues au climat. L'objectif est de fournir une vision relativement exhaustive du poids relatif des grandes fonctions écophysiologiques dans un contexte climatique modifié.

Les grandes fonctions étudiées seront :

- les fonctionnements hydriques des couverts herbacés, arbustifs et forestiers (estimation des besoins en eau, des besoins en irrigation, des remontées capillaires, des termes du bilan d'énergie...)
- la phénologie des céréales (influence contradictoire des besoins en froid et en chaleur, conséquences sur les choix de précocité) et phénologie de la vigne (modification des dates de floraison et de maturité)
- les accidents climatiques : effets des hautes températures sur le développement, la croissance, le bilan de carbone...
- interactions eau x C x N au sein des couverts végétaux (combinaison des stress hydrique et azoté en liaison avec la demande en croissance des parties aérienne et racinaire)
- interactions eau x C x N dans les sols (compétitions entre les mécanismes de minéralisation, nitrification, lixiviation de l'azote, dénitrification, accumulation de résidus, fixation des légumineuses...en comparant des régions tempérées et tropicales afin de fournir des éléments sur l'adaptabilité des microflore)
- risques et nuisibilité des maladies (micro-météorologie des couverts fournissant les contextes de développement des maladies en interaction avec le développement de la plante hôte)

Enfin le dernier volet sera centré sur la diffusion opérationnelle des résultats du projet auprès des scientifiques, des étudiants et des professionnels des métiers de l'agriculture et la forêt. Une base de données sera élaborée à partir des résultats de simulation et un enseignement en ligne sera bâti à partir de ces résultats avec une composante théorique et une composante « travaux dirigés ».

Références

- Badeau V et al. (2005) Rapport Final, Projet CARBOFOR (2005, sous presse).
- Bergez, et al. (2001) *Ecol. Model.*, 137(1): 43-60.
- Boé J. et al. (2007) J. Geophys. Res., in revision.**
- Brefuel (2005)
- Brisson et al., (2003) *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.
- Bussièrè et al., (2002) *Agronomie* (22), 93-103.
- Calvet et al. (1998) *Agricultural and Forest meteorology*, 92:73-95.
- Chanzy et Bruckler (1993) *Water Resources Research*, vol. 29, pp. 1113-1125
- Delos M., Moinard J. (1996) *Med, Fac. Landbouwwet. Univ. Gent* 61/2b: 555-565
- Déqué M. (2006) *Climate Research*, submitted
- Fermaud et al. (2003) *Phytoma la Défense des Végétaux*. 565: 36-40
- Garnier et al. ? (2003) *European J. of Soil Science*, 54:1-14.
- Gate (1996) *Ecophysiologie des céréales*
- Granier et al. (1999) *Ecological Modelling*, 116, 269-283.
- Guilioni et al. (2000) *Agricultural and Forest Meteorologie*, 100: 213-230
- Huber et al. (1998)
- Keller T. et al. (2007) *Soil and Tillage Research*, soumis.
- Lebard 2(005) Thèse INA-PG
- Loustau et al. (2005) *Tree Physiology*, 25: 813-823.
- Martin, et al. (2007) submitted.
- Parton et al. (1987) *Soil Science Society of America Journal*, 51:1173-1179.
- Pieri et Gaudillère (2003) *Vitis* 42 (2): 77-82.
- Robert et al. (2004) *Journal of Experimental Botany*, 55: 1079-1094.
- Roger-Estrade et al. (2000) *Eur. J. Soil Sci.*, 51 : 455-474.
- Terray et Braconnot (2007) *Livre Blanc Escrime (INSU-ONERC-IDDR)*. Paris, 70 pp.

POINT SUR LES OUTILS AUTOUR DU MODELE STICS

THE UTILS OVER THE STICS MODEL

D. Ripoche*, M. Launay, N. Beaudoin, S. Buis

INRA, Agroclim, Domaine St Paul site Agroparc , F-84914 Avignon cedex 9
*domi@avignon.inra.fr

Introduction

Certains outils d'analyse des sorties de Stics, de préparation à la simulation en série ou encore de génération de fichiers d'entrées de Stics sont développés au sein du groupe Stics ou par des utilisateurs et mise à disposition du collectif.

Ce poster reprend la liste des outils actuellement disponibles.

Matériels et méthodes

Génération des fichiers d'entrées

Creabobs : A partir d'une feuille Excel contenant l'entête des colonnes l'utilisateur peut saisir les jours où il a effectivement des observations. Une fois les données saisies, il enregistre les feuilles en format texte (séparateur tabulation) et lance l'exécution de l'utilitaire `creabobs.exe`. `Creabobs` génère un seul fichier d'observation à chaque exécution.

Simulations multiples

Creabatusm60.exe : Cet utilitaire permet de générer un fichier `.bat` permettant de lancer toutes les USM d'un répertoire (USM cultures pures ou cultures associées). Ces USM peuvent être lancées en mode simulation, en mode optimisation, en mode « dépendantes » (simulation de rotation de cultures). Cet exécutable `dos` est livré avec la version standard disponible sur le site Web

Il vous interroge :

- sur le répertoire que vous désirez traiter (toutes les usm du répertoire seront lancées),
- si vous êtes en culture pure ou en culture associée,
- sur le type de simulation que vous voulez réaliser (simulation, optimisation, rotation),
- sur le nom de l'exécutable de Stics choisi parmi la liste disponible.

Il génère un `.bat` dans le répertoire de travail du nom du répertoire.bat, ainsi que tous les fichiers de travail nécessaires aux simulations (`travail.usm`, `stat.dat`)

Au lancement du `.bat` toutes les usms sont exécutés dans les conditions définies précédemment.

Outils statistiques

Opti60var.exe : Cet utilitaire permet de faire une optimisation multivariées (non limité en nombre de variables et nombre de paramètres). Le critère calculé est le moindre carré.

La méthode statistique utilisée est le simplexe, les valeurs des paramètres de départ sont passées au programme par l'intermédiaire d'un fichier de travail `param.sti`.

Les résultats se trouvent dans le fichier `param.tmp`

crossparam.exe : Cet exécutable permet de calculer des distantes observés-simulés sur une combinaison de jeux de paramètres choisis parmi la liste des paramètres optimisables par `Winstics` : 10 paramètres simultanément qui varient selon un pas fixé et un nombre de variation de ce pas.

Les paramètres ainsi que leur pas et nombre de pas sont passés au programme par l'intermédiaire du fichier `param.sti`.

Les sorties sont présentées dans le fichier `superopti.txt` où pour chacune des combinaisons de jeux de paramètres on trouve :

- les valeurs du jeu de paramètre

- pour chaque variable la MSE (?) : $\sum_1^{nbobs} (obs / moy(obs) - calc / moy(obs))^2$

- pour l'ensemble des variables la RMSE (?) : $\sqrt{\sum_1^{nbvar} \sum_1^{nbobs} (obs / moy(obs) - calc / moy(obs))^2 / nbobstot}$

Valid_croisee : Cet exécutable permet de faire de la **validation croisée**

On retire une usm avant chaque optimisation et après convergence on fait tourner l'usm retiré du lot avec le jeu de paramètres optimisés et on calcule la RMSE. Ceci sur toutes les usm avant de calculer une RMSE globale

Analyse des fichiers sorties du modèle

Extracbilan : Cette macro Excel permet de faire les graphes observé/simulé et les calculs statistiques à partir de fichiers s*.sti et .obs de stics. Elle permet aussi de récupérer les stades à partir chaque de b*.sti (pour les cultures annuelles).

Stics6.fn : cette fonction Matlab permet de lancer les usm d'un répertoire et de faire quelques traitements graphiques et statistiques à partir des valeurs observées et calculées par le modèle.

Elle trace un graphique général simulé/observé par pour l'ensemble des usms et par variable ainsi que la courbe des simulées et les points observés par usm et par variable (voir figure 1).

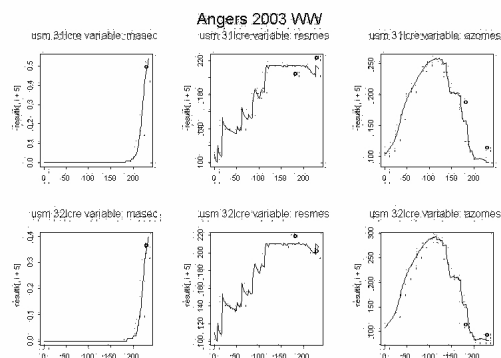


Figure 1 :

Outils divers

pheno : Calcul les dates de levée de dormance et de floraison ;

Ce programme calcule les dates de levée de dormance et de floraison à partir des fichiers climatiques au format Stics et d'un certain nombre de paramètres dans pheno.dat.

Ces stades sont calculés au choix suivant plusieurs méthodes : les dates de fin de dormance selon 4 méthodes (Bidabe, Chill Units, nbre d'heures de froid, date forcée), les dates de floraison suivant 3 méthodes (Bidabe, somme de températures horaires, somme de températures journalières)

Conclusion

Ces utilitaires sont « rentables » dans le cas où l'utilisateur est susceptible de faire tourner le même jeu de données plusieurs fois :

- changement de la valeur d'un paramètre,
- tests sur les valeurs de paramètres,
- modifications du choix des variables de sorties,
- etc.

Car le temps passé à leur prise en main ne doit pas excéder le gain de temps à les utiliser.

Ces utilitaires sont disponibles :

pour certains sur le site web : www.avignon.inra.fr/stics

ou à la demande à l'adresse suivante : stics@avignon.inra.fr

MODELISATION DE LA FLORAISON DES ARBRES FRUITIERS PAR UNE APPROCHE STATISTIQUE PRENANT EN COMPTE LA PHASE DE DORMANCE

MODELLING FRUIT TREES FLOWERING BY A STATISTICAL APPROACH TAKING INTO ACCOUNT THE DORMANCY PERIOD

S. Satger^{1,2}, N. Brisson, I. Garcia De Cortazar, B. Baculat, J.P. Ramel¹

¹ CIRAME, 779 Chemin de l'Hermitage, Hameau de Serres, 84200 CARPENTRAS

² Adresse actuelle : INRA, UMR SYSTEM, 2 place Viala, F-34060 Montpellier
satger@supagro.inra.fr

Introduction

Dans le contexte actuel de réchauffement progressif du climat (+1.5°C à +6°C d'ici la fin du siècle), les professionnels de l'arboriculture s'interrogent sur l'impact que ce changement pourrait avoir sur le cycle des arbres fruitiers (risques de gel si la floraison est plus précoce, capacité d'adaptation des variétés cultivées). La modélisation du fonctionnement de ces espèces pendant la période hivernale (dormance et post dormance) permet, à partir de séries climatiques, de prévoir de manière réaliste la date de floraison. La réalisation de ces simulations nécessite au préalable le paramétrage du modèle utilisé.

L'objectif est ici de présenter la méthode utilisée pour l'estimation des paramètres, puis les jeux de paramètres obtenus pour les différentes variétés des espèces étudiées (abricotier, pêcher, cerisier, prunier, poirier, pommier et noyer). L'utilisation d'observations de floraison dans différents bassins de production sur le territoire national permet une certaine prise en compte de la variabilité climatique rencontrée en France métropolitaine. Le modèle ainsi paramétré permet de simuler les dates de floraison et d'étudier par exemple l'effet du changement climatique sur la floraison des arbres fruitiers. Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme ADAR-ArviClim.

Matériel et méthode

1- La base de données utilisée

Les données phénologiques et climatiques utilisées sont issues de la base de données Phénoclim de l'INRA (Domergue, 2001). L'ensemble des données disponibles pour chaque espèce a été récupéré et mis en forme pour son utilisation dans la procédure informatique réalisant l'estimation des paramètres (procédure programmée sous Matlab). Selon les espèces et les variétés, des observations sont disponibles pour 2 à 8 sites sur les différents bassins de production français. Pour les données climatiques, du fait des formalismes utilisés, seules les températures minimales et maximales sont nécessaires.

2- Modélisation de la date de floraison : formalismes utilisés et estimation des paramètres

Les formalismes utilisés pour simuler les périodes de dormance et de post-dormance sont traduits par l'enchaînement des équations élaborées par Bidabe pour simuler la satisfaction des besoins en froid débouchant sur la levée de dormance, puis celle de Richardson simulant la satisfaction des besoins en chaleur aboutissant à la floraison. Cette combinaison des modèles de Bidabe et Richardson correspond au modèle BRIN issu du travail d'Inaki Garcia de Cortazar sur la vigne.

Dans le modèle de Bidabe, retenu pour la simulation de la satisfaction des besoins en froid aboutissant à la levée de dormance (*LD*), deux paramètres doivent être renseignés :

- **Q₁₀**, qui correspond à une réponse exponentielle aux basses températures de l'air (simulation de l'effet des basses températures par une fonction exponentielle).
- **s_{AF}** (somme d'Action Froid), qui correspond à la somme des Actions Froides journalières (*AF_j*) entre l'entrée en dormance et la levée de dormance (*LD*), c'est à dire la somme des réponses journalières du calcul de l'action des basses températures à atteindre. Dans ce travail nous avons commencé le calcul le 1^{er} octobre, correspondant au jour 274 (275 en année bissextile).

$$s_{AF} = \sum_{j=274}^{LD} AF_j$$

avec

$$AF_j = Q_{10}^{\frac{-T_{\max}(j)}{10}} + Q_{10}^{\frac{-T_{\min}(j)}{10}}$$

Pour le modèle de Richardson, simulant la satisfaction des besoins en chaleur à partir de la levée de dormance et aboutissant au déclenchement de la floraison, trois paramètres doivent être renseignés :

- **T_{base}**, qui correspond à la température minimale en dessous de laquelle la température n'a pas d'action pour la satisfaction des besoins en chaleur
- **T_{seuil_max}**, qui sert à écrêter les températures « élevées » pour limiter leur effet sur la satisfaction des besoins en chaleur
- **s_{GDH}** (somme des « actions chaudes » : Growing Degrees Hours), qui correspond à la somme des « actions chaudes » journalières (*GDH*) entre la levée de dormance (*LD*) et la floraison (Flo).

$$s_{GDH} = \sum_{j=LD}^{Flo} GDH_j$$

15

$$GDH_j = \sum_{h=1}^{24} \min(T_{(h,j)} - T_{base}, T_{seuil_max} - T_{base})$$

Les deux paramètres de besoin en froid du modèle de Bidabe (Q_{10} et s_{AF}) et les trois paramètres de besoin en chaleur de celui de Richardson (s_{GDH} , T_{base} et T_{seuil_max}) sont les cinq paramètres à estimer pour les différentes variétés des sept espèces étudiées. Une difficulté de l'utilisation de ces formalismes est l'absence d'observations pour la levée de dormance (impossible à observer d'un point de vue végétatif) obligeant à ajuster les cinq paramètres simultanément. Cela nécessite de veiller à ce qu'il n'y ait pas de phénomène de compensation entre la durée des phases de dormance et de post-dormance. Pour éviter ce type de biais, des plages de valeurs ont été déterminées pour chaque paramètre.

Par ailleurs, la nécessité de renseigner cinq paramètres variétaux pour l'obtention d'une variable de sortie n'est pas statistiquement correcte. Il a été décidé de fixer, au niveau de l'espèce, au moins un paramètre de besoin en froid et un paramètre de besoin en chaleur. Pour cela nous avons réalisé une analyse de corrélations entre paramètres (vérification du lien entre paramètres et justification de la fixation), puis une analyse de sensibilité afin de déterminer les paramètres à fixer. Ces analyses statistiques sont réalisées, pour chaque espèce, sur un ensemble de jeux de paramètres issu d'optimisations simultanées des cinq paramètres sur 100 échantillons d'observations de floraison issus des dates de floraison disponibles pour chaque variété. Après fixation de certains paramètres, une dernière série d'optimisations est réalisée pour fixer la valeur des autres paramètres pour chaque variété. Un autre critère statistique, la RMSE (Root Mean Square Error), est utilisé pour caractériser la « qualité » des sorties obtenues en utilisant le jeu de paramètres retenus.

Résultats et discussion

Le choix des paramètres fixés au niveau de l'espèce se base sur une analyse statistique réalisée sur l'ensemble des jeux de paramètres obtenus pour chaque variété.. Ainsi, nous avons choisi de fixer le paramètre de besoin en froid ayant le coefficient de variation (CV) le plus faible et, pour les besoins en chaleur, soit T_{base} (température base) soit s_{GDH} (somme d'action chaleur) selon le même critère. Ensuite, si T_{base} est fixé, T_{seuil_max} est également fixé si son CV est inférieur à celui de s_{GDH} . Après une vérification visuelle de la distribution des paramètres, la fixation des paramètres se fait sur la médiane.

Les paramètres ainsi fixés pour chaque espèce sont les suivants :

- Abricotier, pêcher : Q_{10} , T_{base} et T_{seuil_max}
- Pommier, poirier : Q_{10} et T_{base}
- Prunier, cerisier, noyer : Q_{10} et s_{GDH}

Pour chaque variété, l'optimisation simultanée des paramètres restants aboutit à l'obtention d'un jeu de paramètres complet. Le tableau suivant présente les valeurs des paramètres fixés pour chaque espèce ainsi qu'un intervalle pour les valeurs des paramètres variétaux.

	Q_{10}	s_{AF} <i>Jour norm.</i>	s_{GDH} <i>°C.h</i>	T_{base} <i>°C</i>	T_{seuil_max} <i>°C</i>	RMSE <i>jour</i>
Abricotier	3.16	[68.1-86.2]	[3954-5777]	3.87	26.82	[2.82-7.40]
Cerisier	3.28	[82.9-113]	7244	[3.18-5.21]	[16.20-22.44]	[3.01-8.37]
Pêcher	3.13	[77.1-91.9]	[5194-6387]	3.80	25.39	[4.66-9.08]
Prunier	3.21	[84.8-117.3]	6664	[3.17-481]	[18.77-22.09]	[4.58-6.01]
Pommier	3.43	[80.7-101.0]	[7309-8443]	4.87	[14.41-20.06]	[4.61-6.77]
Poirier	3.36	[86.3-101.8]	[6628-7462]	4.60	[15.22-21.23]	[5.46-6.42]
Noyer	3.46	[89.1-109.6]	7954	[4.10-5.97]	[8.98-11.93]	[7.17-10.21]

Tableau 1 : Jeux de paramètres obtenus pour chaque espèce

Malgré l'existence de sources d'erreurs potentielles connues (nombre d'observations parfois faible, estimation de dates d'observation, reconstitutions de séries climatiques, simplification de la réalité...), les jeux de paramètres obtenus permettent de réaliser des simulations réalistes de dates de floraison des arbres fruitiers sur la France métropolitaine avec différentes séries climatiques (séries réelles et scénarios climatiques futurs).

Références

- Bidabe B. (1963) Contrôle de l'époque de floraison du pommier par une nouvelle conception de l'action des températures. C.R. Acad. Agric., 934-935.
- Domergue M. (2001) Impact du réchauffement climatique sur le parcours phénologique d'espèces variétés fruitières dans la vallée du Rhône. Mémoire de fin d'études ESITPA.
- García de Cortázar Auri I. (2006) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier. 349 pp
- Richardson E.A, Seeley S.D et Walker D.R, (974) A Model for Estimating the Completion of Rest for « Redhaven » and « Elberta » *Peach Trees, Hort. Sci.*, 1: 331-332.

UNE APPROCHE BAYESIENNE POUR ESTIMER LES PARAMETRES DE STICS : APPLICATION A LA CULTURE DU POIS

A BAYESIAN APPROACH TO ESTIMATING THE PARAMETERS OF THE CROP MODEL STICS FOR PEA

Daniel Wallach^{1*}, Virginie Henin¹, David Makowski², Eric Justes¹

¹ INRA, UMR INRA-ENSAT 1248 AGIR, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex

² INRA, UMR INRA-INA P-G Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon

*Daniel.Wallach@toulouse.inra.fr

Introduction

Des modèles de culture, comme STICS, sont irremplaçables pour explorer une large gamme de systèmes de culture notamment afin de comparer leurs performances en fonction du sol et du climat. En général il faut une étape préalable d'estimation des paramètres du modèle. C'est une étape qui pose des questions statistiques et numériques difficiles mais aussi des questions liées au sens réel du modèle, du type : i) que représentent exactement les paramètres ? ii) ont-ils un « vrai » sens biologique ou physique, iii) pourquoi faut-il les estimer de nouveau dans certains contextes ? L'utilisation du modèle après paramétrisation peut également poser des questions. En particulier, comment quantifier l'incertitude dans les prédictions du modèle qui résultent des incertitudes dans les valeurs des paramètres.

Ce travail considère le cas particulier de la culture du pois de printemps. On a mis en œuvre une méthode Bayésienne pour l'estimation des paramètres de STICS pour cette culture, utilisant un jeu de données très conséquent (Voisin, 2002 ; Corre-Hellou, 2005 ; autres données INRA). Le cadre Bayésien nous permet i) de proposer une démarche pour l'estimation des paramètres qui est applicable même dans des cas complexes, ii) de considérer les questions de fond citées ci-dessus, et enfin iii) de montrer comment on pourrait évaluer l'incertitude dans les prédictions du modèle.

Données

Les données viennent de 9 essais différents : Angers avec 2 traitements en 2002, 2 en 2003 et 1 en 2004, Dijon avec 3 traitements d'azote en 1999 et Rennes avec 1 traitement en 2005.

Les mesures sont indiquées dans le tableau suivant :

Variable	MS	N plante	N fixé	Nmin sol	Eau sol	LAI	Rdt	N grain
Nombre de mesures en cours de cycle cultural	7-24	7-24	7-24	5-6	5	2-6	1	1

MS = matière sèche aérienne. N plante = quantité d'azote contenue dans les parties aériennes de la plante. N fixé = quantité d'azote fixé par la plante. Nmin sol = quantité d'azote minéral du sol. Eau = stock en eau du sol. LAI = indice foliaire. Rdt = rendement. N grain = teneur en azote des graines à la récolte.

Modèles

Le modèle statistique utilisé est :

$$\ln(Y) = \ln\{f(X; \theta)\} + \varepsilon$$

où Y est le vecteur des sorties, $f(X; \theta)$ est le vecteur des prédictions de STICS, X représente les variables explicatives, θ est le vecteur des paramètres de STICS et ε est le vecteur des erreurs résiduelles. La transformation logarithmique permet d'homogénéiser les variances des erreurs de mesure.

La formule de base de la méthode Bayésienne est la suivante :

$$f(\theta | Y) = \frac{f(Y | \theta)\pi(\theta)}{\int f(Y | \theta)\pi(\theta)d\theta}$$

où $f(\theta|Y)$ est la distribution **a posteriori** des paramètres, $\pi(\theta)$ est la distribution **a priori** des paramètres et $f(Y|\theta)$ est la vraisemblance.

Il n'est pas envisageable d'estimer la totalité des paramètres de STICS. Nous avons donc choisi 28 paramètres qui semblent être les plus importants pour nos variables de sortie. Ce choix s'est en partie basé sur une analyse de sensibilité globale. Les autres paramètres ont été fixés à leurs valeurs par défaut donné par les concepteurs du paramétrage de STICS et du pois (Corre-Hellou, 2005). Nous faisons l'hypothèse que malgré d'éventuelles erreurs dans ces autres paramètres, ainsi que dans les équations du modèle, les meilleures prédictions seront obtenues en approchant les vraies valeurs pour les paramètres à estimer. On peut également postuler que la plupart des paramètres ont un sens indépendamment du modèle STICS, et la notion de « vraie » valeur y fait référence. La posture contraire serait de supposer que tous les paramètres sont empiriques, à choisir simplement pour optimiser l'accord entre STICS et le jeu de données.

On a testé deux hypothèses par rapport aux corrélations de ϵ . La première suppose que tous les éléments de ϵ sont indépendants, et que toutes les erreurs pour une même variable de sortie ont la même variance. La seconde suppose que les mesures à différentes dates pour un même essai et même variable de sortie sont complètement redondantes, et que l'on peut alors travailler avec une valeur MSE moyenne. Pour chaque cas, nous avons testé deux hypothèses concernant les variances : variances fixées et égales aux variances des erreurs de mesure, ou variances traitées comme des paramètres, à estimer donc à partir des données. Enfin, on teste deux façons pour conduire les calculs : dans un cas tous les paramètres sont estimés ensemble, dans l'autre on sépare les paramètres en trois groupes, ceux qui entrent dans les équations pour LAI, ceux qui entrent dans les équations pour le rendement et la teneur en azote des graines, et les autres. Ceci est possible en utilisant la fonction de forçage de STICS par le LAI.

On estime la distribution **a posteriori** par la méthode de « importance sampling » suivie d'une étape de ré-échantillonnage. La distribution de proposition est le produit de la distribution **a priori** pour θ et d'une distribution gamma pour les variances si celles-ci sont considérées comme des paramètres.

Résultats et discussion

Les résultats de l'approche qui nous semble la plus satisfaisante ont été obtenus pour l'hypothèse où les mesures en cours de saison sont redondantes, le traitement des variances réalisé comme des variables à estimer, la séparation des paramètres en trois groupes et les résultats pour le troisième groupe. Ce sont ceux pour lesquels nous présenteront brièvement quelques données.

Le tableau suivant présente les écart-types pour les erreurs de mesure ainsi que pour les erreurs résiduelles du modèle. Nous alertons le lecteur sur le fait que ces valeurs s'appliquent aux logarithmes des variables initiales.

Variable	Matière sèche	N plante	N fixé	Nmin sol	Eau sol
Variances, erreurs de mesures	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1
Variances, après estimation	0.4	0.3	1.6	0.4	0.1

Le tableau suivant indique, pour quelques-uns des paramètres, la moyenne pour la distribution **a posteriori** ainsi que pour la distribution **a priori**.

Paramètre	efcroijuv	concNrac100	concNrac0	stlevdno	stnofvino	stdnofno	stlevamf
a priori	1.6	0.15	0.75	105	250	950	150
a posteriori	1.7	0.15	0.91	92	249	900	84

La distribution de la probabilité obtenue **a posteriori** est très différente selon les paramètres. Elle n'est pas souvent univoque ni de type Gaussien. Ce résultat est intéressant car il peut permettre de repérer des éventuels problèmes de formalisme.

Conclusions

Les conclusions suivantes sont pour l'instant préliminaires. Elles sont à 3 niveaux :

1. Concernant les équations de STICS pour la culture de pois. Le fait que les erreurs par rapport à la quantité d'azote fixée sont très importantes suggère qu'il faudrait revoir les hypothèses représentant le fonctionnement de la fixation symbiotique.

2. Concernant l'utilisation de STICS pour faire des prédictions. Ce travail fournit une distribution pour chaque paramètre, ainsi qu'une estimation de l'erreur résiduelle. L'ensemble permet de calculer des intervalles de confiance pour les prédictions de STICS.

3. Concernant la méthodologie de l'estimation des paramètres. Nous avons comparé plusieurs méthodes, toujours dans le cadre Bayésien. Les résultats les plus probants ont été obtenus en prenant en compte le fait que les erreurs résiduelles ne sont pas indépendantes, en traitant les variances résiduelles comme des paramètres à estimer et en utilisant la possibilité de forçage afin de ne pas estimer simultanément tous les paramètres.

Références

Le théorème de Bayes est un résultat de base en théorie des probabilités, issu des travaux du révérend Thomas Bayes (1702-1761). Dans son unique article, Bayes cherchait à déterminer ce que l'on appellerait actuellement la distribution a posteriori de la probabilité p d'une loi binomiale. Ses travaux ont été édités et présentés à titre posthume (1763) par son ami Richard Price dans un essai pour résoudre un problème dans la théorie des risques (An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances). Les résultats de Bayes ont été repris et étendus par le mathématicien français Laplace dans un essai de 1774, lequel n'était apparemment pas au fait du travail de Bayes. ([source](#) : site Web Wikipedia).

Corre-Hellou G. (2005) Acquisition de l'azote pour les associations de pois et d'orge (*Pisum sativum* L. – *Hordeum vulgare* L.) en relation avec le fonctionnement du peuplement. Thèse de doctorat, Ecole doctorale d'Angers, 130 p. + annexes.

Voisin A.S. (2002) Etude du fonctionnement des racines nodulées du pois (*Pisum sativum* L.) en relation avec la disponibilité en nitrates du sol, les flux de carbone au sein de la plante et la phénologie : croissance des racines nodulées et activité fixatrice des nodosités. Thèse de doctorat INA P-G, 129 p. + annexes.

Remerciements

Ce travail a été financé par les projets européens intégrés Grain Legumes et SEAMLESS.

ARTIX : BASE DE DONNEES ET SOLUTION LOGICIELLE POUR LE COUPLAGE DE STICS ET DU MODELE ECONOMIQUE AROPAJ

ARTIX : DATABASE AND SOFTWARE APPLICATION FOR THE COUPLING BETWEEN STICS AND THE ECONOMIC MODEL AROPAJ

N. Novello, P. Zakharov*

INRA, UMR Economie Publique, BP 01, F-78850 Thiverval Grignon

*pzakharov@grignon.inra.fr

Introduction

Le projet ArTix qui se compose d'une base de données et d'une application logicielle a été développé dans le cadre du couplage initié par la thèse de Caroline Godard entre STICS et le modèle économique d'offre agricole AROPAj.

L'objectif initial du projet ArTix est la détermination des courbes de rendement à l'azote des principales grandes cultures européennes pour améliorer la prise en compte de la relation entre les intrants azotés et le niveau de production au sein du modèle économique. L'extension de cette méthodologie à des réponses « rendements » sous conditions de changement climatique ou à des réponses « N₂O » par exemple permet d'évaluer les impacts des politiques agro-environnementales.

Le modèle économique AROPAj impose l'échelle des exploitations agricoles types qui sont des fermes virtuelles définies statistiquement et qui représentent la diversité des systèmes de production de chaque région européenne. La typologie d'AROPAj comprend 734 fermes types en 1997 et 1074 en 2002 (années des données RICA de calibrage du modèle économique).

Le modèle STICS est choisi pour fournir la réponse de chacune de ces exploitations types en terme de rendement à l'apport azoté.

Afin de ne pas fixer les entrées STICS de façon trop rigide tout en restant dans des limites raisonnables en terme de nombre de simulations STICS, il est décidé de simuler les rendements de chaque ferme type sur 5 sols de caractéristiques distinctes pour 2 précédents culturaux différents et pour 3 variétés ou dates de semis de chaque culture. Cela doit être fait pour chaque dose d'azote entre 0 et 600 unités (pas de 20) et pour une année de récolte correspondant à l'année de calibrage du modèle économique. Dans certain cas ces simulations doivent aussi être réalisées avec 2 conditions différentes sur l'irrigation. Les « bonnes entrées » STICS sont déterminées en aval lors de la phase de sélection des courbes (cf. poster méthode, P. Zakharov). Une fois ces entrées fixées, on doit pouvoir réaliser les simulations STICS correspondantes (sol, variété ou date de semis, précédent et irrigation fixés) en modifiant certaines entrées, par exemple, l'année de récolte pour évaluer l'impact d'un changement climatique.

Il s'agit donc pour le projet ArTix de fournir les outils d'automatisation permettant d'organiser et d'enchaîner un très grand nombre de simulations STICS (soit $\sim (5 \times 2 \times 3 \times 30 \times 2) = 900$ (1800) runs) et cela pour une dizaine de grandes cultures et pour toutes les fermes types de l'Union Européenne.

Les données RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) utilisées par AROPAj à partir desquelles sont définies les exploitations types sont essentiellement de nature comptable. Les informations indispensables à STICS (conditions de sol, climat, itinéraire technique) doivent donc provenir de sources alternatives.

Avec ses deux aspects, base de données et application logicielle, ArTix fournit donc un stockage organisé de toute l'information permettant la gestion et la mise en forme de l'ensemble des données, ainsi qu'un ensemble de traitements automatiques indispensables au couplage.

La base de données Artix

De type relationnel, elle a été mise en place sur PostgreSQL. Elle s'organise autour de deux entités principales issues du modèle AROPAj : l'exploitation type et l'activité végétale et regroupe l'ensemble des données nécessaires à la génération automatique des fichiers d'entrées de STICS pour chaque combinaison de ces deux entités.

Elle regroupe donc à la fois des données physiques (variables climatiques, données sur les sols) des données relatives aux itinéraires techniques des cultures (variétés, type d'engrais, fractionnement, irrigation, ...) et des données économiques ou comptables (prix de vente des cultures, rendements de référence, ...).

Cette base rassemble des données de sources diverses. Par exemple, elle regroupe celles issues de l'estimation et/ou du calibrage du modèle AROPAj (surfaces des cultures, effectifs animaux, ...). La confidentialité des données individuelles du RICA est respectée dans la mesure où les informations ne sont disponibles qu'à l'échelle de la ferme type. Elle contient aussi des informations provenant de bases de données fournies par divers partenaires. On peut notamment citer l'unité INFOSOL de l'INRA Orléans pour les données sol, le Joint Research Center (projet MARS) pour les informations climatiques ou encore d'autres organismes comme Eurostat ou la FAO, pour des données sur les prix d'engrais par exemple. Pour le reste il s'agit essentiellement de dire d'experts ou d'études réalisées à des échelles nationales ou régionales dont on doit se contenter et qui peuvent être complétées par des règles de décision.

En plus de la sauvegarde et de l'organisation de données brutes, la base fixe les liens géographiques entre toutes ces données pour adapter les fichiers d'entrées STICS à chaque exploitation type et à chaque culture. Cela constitue donc une sorte de « spatialisation » de STICS.

Par exemple, pour affecter un fichier climat à chaque ferme type, on dispose :

- des données climatiques brutes pour chaque cellule de la grille MARS
- de l'appartenance régionale et altitudinale de chaque cellule MARS
- de l'appartenance régionale et altitudinale de toutes les exploitations

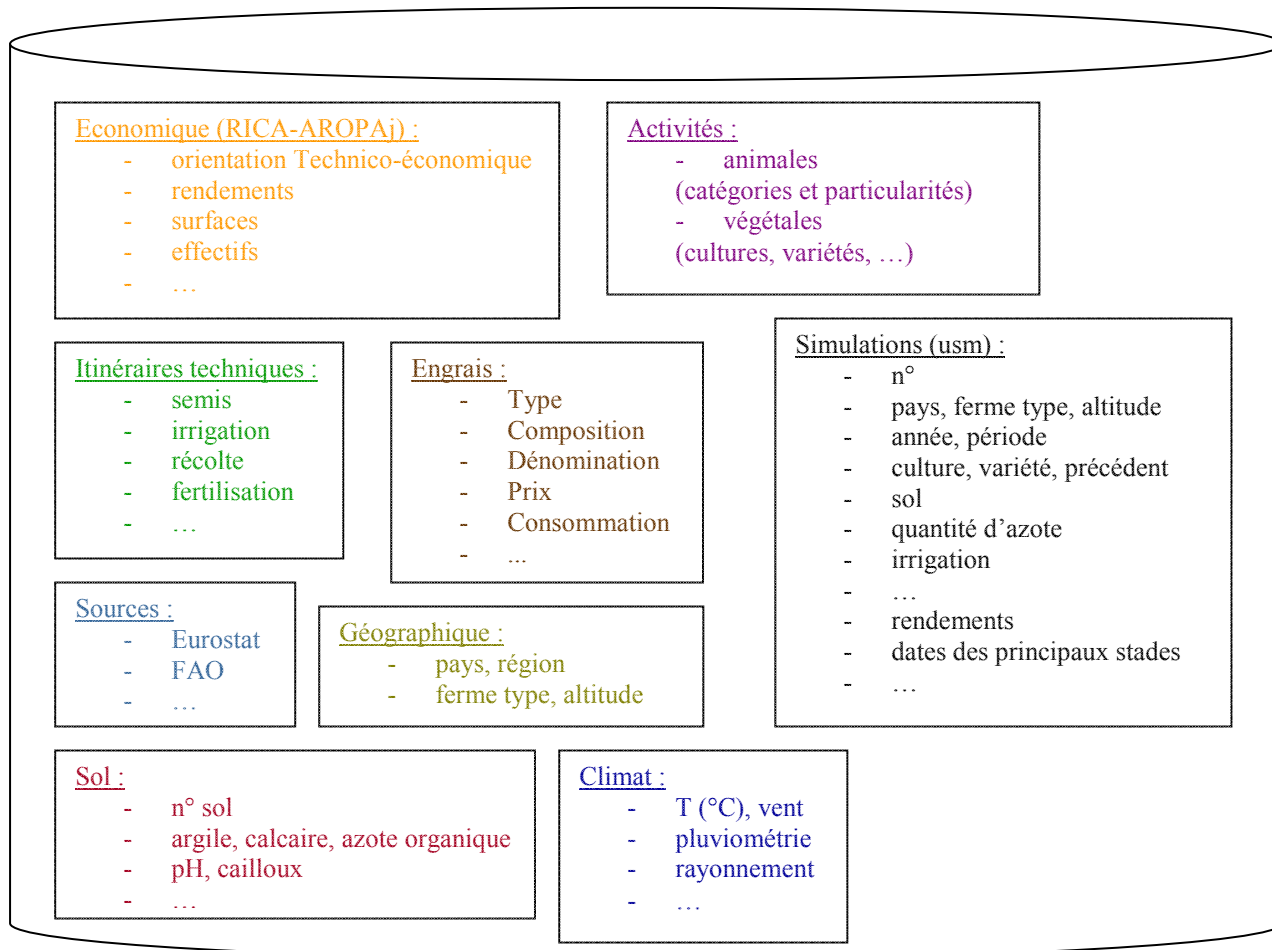
puis on lie et on moyenne ces éléments pour fixer le climat moyen de chaque ferme type.

De même, les données sol sont liées aux exploitations types par l'intermédiaire de l'appartenance régionale et altitudinale puis sont triées par surface (seuls les 5 plus grands sols sont ensuite utilisés pour les simulations).

Pour la définition des itinéraires techniques, la spatialisation est moins évidente à réaliser car ces données sont principalement issues de dire d'experts ou de base de données nationales et difficile à obtenir pour toute l'Europe et donc à répartir pour chaque ferme-type. Néanmoins, certains aspects sont directement issus de règles de décision applicables à toute l'Europe, comme par exemple le fractionnement de l'apport d'azote par culture.

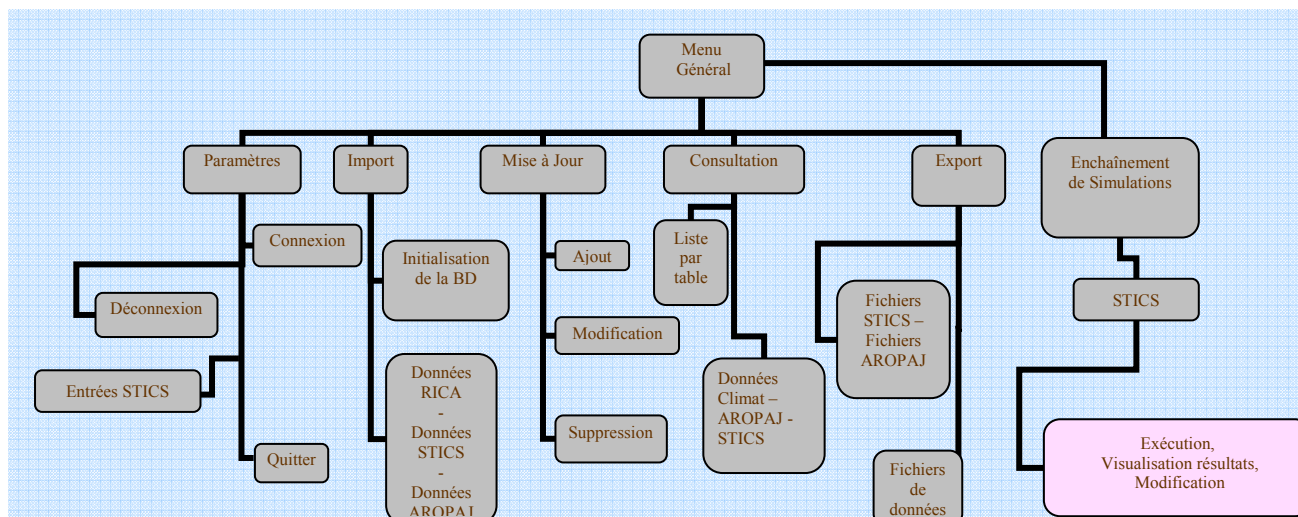
Enfin, cette base permet aussi de sauvegarder un grand nombre de sorties STICS (rendements, dates des différents stades d'évolution de la culture, ...) pour chaque simulation réalisée et permet ainsi d'analyser a posteriori la pertinence des conditions d'entrée imposées.

Le schéma ci-dessous donne un aperçu du contenu de la base de données ArTix :



L'application ArTix

Son architecture s'appuie sur un modèle Client/Serveur accédant à une base de données relationnelle. Elle est prévue pour s'intégrer dans un réseau de données ou pour une utilisation en local. Les composantes de l'application font appel au langage de développement Java et au SQL, langage de manipulation de bases de données. Ces choix techniques répondent à un souci de portabilité sur différents environnements informatiques. Le schéma ci-dessous résume la couverture fonctionnelle du logiciel ArTix.



La couverture fonctionnelle d'ArTix comprend :

- La connexion/déconnexion aux bases de données (base ArTix et autres sources de données préalablement définies).
- La collecte des informations :
 - Un menu d'importation générique permet de charger directement un ensemble de données à partir d'un fichier formaté suivant la structure de la table concernée. Des menus spécifiques permettent la lecture de données économiques (RICA, AROPAj) présentées sous forme de fichiers texte et possédant une structure fixe. Certains fichiers STICS (entrée/sortie) peuvent être lus directement pour renseigner les tables correspondantes de la base, par exemple, le fichier param.sol pour la table sol ou certains fichiers.sti.
 - L'utilisateur peut se connecter à une base externe afin de choisir une table dont le contenu est à charger dans la table d'ArTix choisie (données météorologiques, sols).
 - Des fenêtres de mise à jour sont disponibles pour des saisies individuelles (données géographiques, engrais, données techniques, ...).
- La génération automatique de fichiers STICS régionaux : sols (param.sol), climatiques par altitude (nomStation.AN et stat.dat), techniques (NomFichier.tec), et d'initialisation des simulations (Travail.usm) au format attendu par le modèle STICS.
- Les enchaînements de simulations STICS :
 - Avec degrés de liberté : permet le choix du pays ou de la région ou de l'exploitation type, des cultures (le choix de la culture suffit à lancer la simulation de toutes ses variétés prédéfinies), du précédent cultural, de l'intervalle et du pas pour les quantités d'azote (sous forme organique et/ou minérale). Automatiquement, les fichiers nécessaires à STICS sont générés dans le répertoire adéquat pour chaque exploitation type, chaque sol, chaque variété et chaque quantité d'azote puis le modèle est appelé. A la fin de chaque simulation, les fichiers de sortie sont lus et les informations utiles au projet sont enregistrées dans la base. Les fichiers sont ensuite supprimés sauf pour les cas présentant des erreurs de simulations pour lesquels les fichiers history.sti sont conservés pour permettre d'identifier le problème.
 - Sans degré de liberté : du même type que le menu précédent mais permettant de faire les enchaînements de simulations STICS pour les « bonnes entrées ».
- La consultation des données de la base ArTix et l'exportation de données sous forme de fichiers facilement manipulables par d'autres utilisations (vers outils statistiques ou autres logiciels), avec choix du séparateur. Les fichiers STICS (sol, technique, climat et initialisation de simulation) peuvent aussi être générés.

Conclusion

L'orientation conviviale de l'interface homme/machine que propose ArTix peut parfois restreindre les ambitions d'automatisation des traitements pour toutes les fermes types européennes. Avec la mise en place d'une version Unix de l'application (en cours de validation) permettant de se dispenser de cette interface, de nettes améliorations sont attendues sur la rapidité et la flexibilité des traitements proposés.

Il faut aussi souligner la valorisation importante de l'outil ArTix dans de nombreux projets. Aujourd'hui, au-delà de la thématique propre à la thèse de Caroline Godard, il est aussi impliqué dans d'autres projets :

- Adaptation au changement climatique (thèse d'Elodie Debove)
- Tassement des sols dans le cadre du programme ADD (Edouard Baranger)
- Indicateurs environnementaux dans le cadre du projet FP6 GENEDEC (Sophie Durandeu)

THEME 6

ELEMENTS DE DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DU SOL INTRODUITS DANS STICS

SOME CHARACTERISTICS OF SOIL STRUCTURE THAT HAVE BEEN INTRODUCED IN STICS

G. Richard*, N. Brisson **, S. Lebonvallet**, D. Ripoche**, H. Boizard***, P. Défossez***,
A. Chanzy****, J. Roger-Estrade*****

* INRA, UR0272 Science du Sol, F- Orléans (Guy.Richard@orleans.inra.fr)

** INRA, Agroclim, Avignon France

*** INRA, Agronomie, Laon-Reims-Mons, France

**** INRA, UMR CSE, Avignon France

***** AgroParisTech, Grignon France

Introduction

Jusqu'à présent la structure du sol était considérée dans STICS comme un caractère permanent, supposé invariant sur la période de simulation qui peut aller de la saison de culture à la succession de cultures annuelles. Si la rugosité et la proportion d'eau ruisselée qualifient l'état de surface, deux paramètres caractérisent la structure de chaque horizon de sol pris en compte par le modèle : la masse volumique et l'infiltrabilité journalière au niveau de la macroporosité à la base de l'horizon. Si l'on peut raisonnablement faire l'hypothèse que ces caractéristiques ne varient pas dans les horizons de sub-surface (au-delà de la profondeur maximale de travail de sol), cette position est beaucoup plus discutable pour les horizons dont on sait que la structure varie avec les opérations de travail du sol, les tassements occasionnés par les passages d'engins et le climat. Nous nous sommes donc intéressés à ces différents éléments en essayant d'intégrer dans STICS, de façon simple, des connaissances sur les effets du système de culture (travail du sol, tassement) et du climat sur la structure des horizons perturbés. Nous en proposons ici une synthèse.

La prise en compte de la structure du sol dans STICS

La structure d'un sol est définie par (1) l'organisation spatiale des particules élémentaires de sol et l'intensité des liaisons entre ces particules, (2) l'organisation du volume poral et de la connectivité entre les pores. Elle peut donc être étudiée à partir de la phase solide ou des vides d'un sol. A l'échelle du profil cultural, la structure est le plus souvent caractérisée à partir de l'observation directe des fragments terreux au sein d'un horizon par trois critères (Roger-Estrade *et al.*, 2004) :

- la taille des fragments : millimétrique (terre fine), centimétrique (motte), décimétrique ;
- le niveau de porosité interne aux fragments : motte □ (absence de porosité visible) ou sinon motte Γ ;
- le mode d'agencement des fragments (fragmentaire avec des fragments peu soudés, massive avec un seul fragment de taille décimétrique résultant d'un tassement sévère).

On caractérise les pores selon leur origine (texturale/structurale) ou leur taille (micro-, méso- ou macro-pores). La porosité texturale correspond à l'agencement des particules élémentaires et ne dépend que de leur distribution granulométrique. La porosité structurale est le complément de la porosité texturale par rapport à la porosité totale. Elle dépend des contraintes appliquées au sol qui peuvent être d'origine anthropique (passage d'engin), climatique (humectation/dessiccation, gel/dégel) ou biologique (racines, macrofaune). La macroporosité correspond aux pores d'un diamètre équivalent supérieur à 100 µm. Elle correspond à la différence entre la teneur en eau volumique à saturation et la teneur en eau volumique à un potentiel voisin de -50 hPa. La microporosité correspond au volume de pores < 100 µm. Elle est proche de la teneur en eau à la capacité au champ qui peut être mesurée *in situ* après ressuyage du sol. Le potentiel hydrique correspondant à la capacité au champ varie de -100 hPa (sol sableux) à -500 hPa (sol argileux).

En nous appuyant sur les résultats de Mumen (2006), nous avons pu estimer, dans le cas d'un sol limoneux profond du Bassin de Paris, les paramètres physiques de STICS influencés par la structure. Ce travail a été réalisé par inversion de STICS sur des simulations du modèle mécaniste TEC (Chanzy et Bruckler, 1993), lui-même ajusté sur des mesures *in situ*.

Masse volumique (DA en $g\ cm^{-3}$)	Infiltrabilité ($INFIL$ en $mm\ j^{-1}$)	Profondeur affectée par l'évaporation ($ZESX$ en cm)	Limite d'évaporation potentielle du sol (Q_0 en mm)
1.1*	5.2	19	5.4
1.6*	1.3	35	1.5

Tableau 1 : Valeurs des paramètres hydriques mesurés ou estimés qui sont reliés à la structure du sol*
Par ailleurs, la modification de la masse volumique liée au tassement induit, à masse de sol constante, des

modifications d'épaisseur des horizons dont il faut absolument tenir compte, par une simple règle de proportionnalité. Enfin, de façon plus indirecte, le caractère tassé du sol diminue la vitesse de minéralisation (K_{2PO_4} dans Brisson *et al.*, 1998) : dans le même sol de Mons, une estimation à partir de mesures donne une diminution de l'ordre de 20 % de la valeur du coefficient de minéralisation quand on passe d'un sol émietté en surface à un sol tassé. La généralisation des paramètres qui renseignent la structure à une gamme étendue de types de sol fait actuellement l'objet d'un travail de thèse (Lefebvre *et al.*, 2007).

Simulation de l'évolution de la structure du sol

Sous l'effet du tassement lié aux passages des engins agricoles

Nous avons supposé que les engins susceptibles de provoquer un tassement sévère du sol étaient uniquement ceux impliqués dans les opérations de semis et de récolte. Pour simuler ce tassement, plusieurs paramètres nouveaux ont été introduits qui intègrent de façon empirique les interactions sol-engin. Il s'agit de la teneur en eau gravimétrique moyenne du sol au-delà de laquelle il y a tassement, de l'épaisseur de sol affectée et de la masse volumique résultante. L'impact du tassement peut s'exercer sur le premier ou les deux premiers horizons définis dans le fichier sol. Dans un avenir proche, les relations entre ces paramètres et la nature du système sol-engin devraient pouvoir bénéficier des connaissances en mécanique des sols, grâce par exemple aux sorties du programme COMPSOIL (Défossez *et al.*, 2003).

Actuellement le tassement provoque une augmentation de la masse volumique, une diminution de l'épaisseur des horizons affectés et une diminution de l'infiltrabilité à leur base, à partir d'une table empirique s'appuyant sur les travaux récents de Viloingt (2005), complétant ceux déjà cités (Tableau 2). En l'absence de généralisation des relations du Tableau 1, les paramètres $ZESX$ et Q_0 ne sont pas affectés.

Masse volumique ($g\ cm^{-3}$)	Infiltrabilité ($mm\ j^{-1}$)
1.1	5.2
1.2	4.5
1.3	3.5
1.4	2.8
1.5	2.0
1.6	1.3

Tableau 2 : Relation entre masse volumique et infiltrabilité établie sur 2 sols du Bassin de Paris (Mons et Boigneville)

La modification de la géométrie du sol se répercute sur les profils d'eau et d'azote. Nous supposons une conservation des quantités intra horizon qui sont réparties de façon homogène.

Nous avons supposé que le tassement ne modifiait pas la rugosité de surface du sol ($ZOSOLNU$) et, surtout qu'il n'affectait que les caractéristiques de sub-surface.

Sous l'effet des outils de travail du sol

Les outils de travail du sol (avec ou sans retournement) provoquent une fragmentation du sol qui s'accompagne d'une diminution de sa masse volumique. Selon le type d'outil, cette fragmentation concernera un horizon superficiel (cas d'un déchaumage) ou l'ensemble de l'horizon travaillé (cas de la charrue à versoir, d'un décompacteur). Ainsi la façon de diviser le sol en horizons doit être en accord avec les différentes opérations de travail du sol pratiquées. Dans le cas du sol de Mons déjà mentionné, nous avons défini deux horizons travaillés : l'un de 10 cm d'épaisseur correspond au travail du sol superficiel (avec un chisel), l'autre de 20 cm d'épaisseur correspond aux opérations de travail profond (avec une charrue). Pour chaque type d'outil, une masse volumique « après travail » a été définie : 1.1 pour le chisel et $1.3\ g\ cm^{-3}$ pour la charrue. De façon analogue à ce qui a été fait pour le tassement, les modifications de masse volumique impliquent des modifications d'épaisseur des horizons, d'infiltrabilité et par suite, une redistribution de l'eau et de l'azote, en gardant toujours l'hypothèse d'une répartition uniforme par horizon concerné.

Le travail du sol modifie également la rugosité de surface du sol. Le labour va l'augmenter de façon significative, ce qui va avoir un impact sur l'évaporation. Cependant le bilan hydrique reste positif dans un sol labouré, car cette augmentation d'évaporation est compensée par un accroissement de l'infiltrabilité. Notons que la prescription de ces opérations était déjà faite dans le fichier technique, qui prévoyait leur impact sur la décomposition des résidus organiques. Nous y avons ajouté l'effet sur la structure du sol.

Sous l'effet de la pluie : formation d'une croûte de battance

Après le semis, il peut y avoir, plus ou moins rapidement selon le type de sol, l'apparition d'une croûte de battance qui constitue un obstacle physique à la levée. Le développement de cette croûte dépend aussi de l'état de fragmentation de la surface du sol, lui-même lié à la préparation du lit de semences. En effet, les pluies post-semis provoquent une désagrégation des fragments de sol et l'apparition d'une fine couche de sol continue, d'épaisseur inférieure à 1 cm. Le dessèchement peut ensuite rendre cette couche quasi infranchissable pour les plantules, sauf au travers des fissures. La nature de l'obstacle qui se constitue dépend du climat, par le biais de sa demande évaporative et de la force exercée par les plantules pour le franchir. Le formalisme proposé repose sur le travail de Durr *et al.* (2001). La croûte de battance peut se

former à partir d'une certaine quantité de pluie après le semis (paramètre PLUIEBAT), qui dépend du type de sol. Elle est considérée comme sèche et donc comme un obstacle à la levée quand l'épaisseur du mulch naturel dépasse le seuil correspondant au paramètre MULCHBAT. Il en résulte une variable binaire présence/absence de la croûte de battance en tant qu'obstacle à la levée.

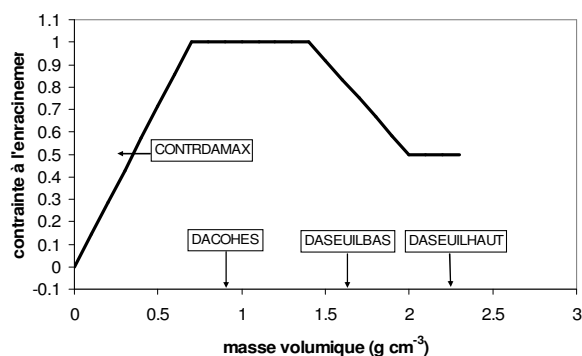
Les impacts des modifications de la structure du sol

Les effets primaires

Quand il s'est formé une croûte de battance et que la plantule en phase de croissance souterraine parvient au niveau de cette croûte, il se produit un retard de levée (arrêt de l'accumulation de temps thermique utile à la levée) qui peut engendrer un déficit de densité par une relation convertissant un excès de durée entre germination et levée en défaut de levée (Bradford, 2002). Ce déficit dépend de la capacité de la plante à franchir la croûte (paramètre VIGUEURBAT). Evidemment dès qu'il pleut, la croûte disparaît et le processus de croissance continue normalement.

Sensibilité du sol à la battance (BS)	Non	Forte SB	Faible SB	Forte SB
Vigueur de la plante (VP)	-	Forte VP	Faible VP	Faible VP
PLUIEBAT (in mm)	50	3	9	3
MULCHBAT (cm)	0.5	0.5	1.5	0.5
VIGUEURBAT	-	0.8	0.15	0.15
Durée semis-levée (jours)	12	27	24	27
Densité levée/ densité semée (%)	77	64	31	19

Tableau 3 : Analyse de sensibilité des variables de levée aux paramètres de battance (exemple du maïs dans l'ouest de la France en 1996)



La masse volumique a un impact direct sur la croissance des racines, en profondeur et en densité (Figure 1). La paramétrisation de la fonction de réponse s'appuie sur les travaux de Rebière (1996), indiquant qu'au-delà d'une masse volumique d'environ 1.4 g cm⁻³, la vitesse de croissance des racines diminue.

Figure 1 : Effet de la masse volumique sur la croissance des racines

Le bilan hydrique du sol est largement affecté par les paramètres liés à la structure (Tableau 1 et rugosité de surface). La circulation de l'eau est ralentie par le tassement à cause de la diminution de l'infiltrabilité (INFIL) : il s'en suit une augmentation du ruissellement par débordement. Ce dernier est sans doute exagéré dans le modèle car il ne permet pas la stagnation d'eau et le flaquage et donc interdit la ré-infiltration le lendemain de l'eau évacuée par ruissellement la veille.

Par ailleurs, l'évaporation du sol est diminuée par le tassement (Q_0) même si elle intéresse une couche plus épaisse (ZESX) ; *a contrario* elle est augmentée par le labour, effet renforcé par l'augmentation de rugosité du sol (Z0SOLNU). La résultante de ces effets, qui restent à valider pour différents types de sol, pourrait expliquer l'intérêt du labour précoce dans des zones à pluviométrie limitée comme le sud de l'Altiplano bolivien (Tableau 4), pour favoriser l'humidité de l'horizon dans lequel sont semées les graines en poquet.

année	Cumul d'évaporation (mm)			Humidité de l'horizon 5-30 cm (% pondéral)		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005
Labour	115	125	153	6	5	10
Non labour	118	111	110	4	1	10

Tableau 4 : Simulation de l'influence du labour précoce (7 mois avant le semis : période de cumul de l'évaporation) sur l'état hydrique du sol au moment du semis en zones sèches du sud de l'Altiplano bolivien

Les effets secondaires

Aux effets primaires du tassement sont associés des effets secondaires parmi lesquels le plus important est l'excès d'eau et ses conséquences. Le remplissage de la macroporosité génère une anoxie qui i) pénalise la croissance des racines (augmentant ainsi l'effet mécanique de la masse volumique élevée), ii) pénalise directement la croissance aérienne (stress d'excès d'eau qui provoque une fermeture stomatique et ralentit l'expansion foliaire) et iii) active la microflore dénitrifiante, provoquant à la fois une carence azotée et une émission de N_2O . Cependant, nous avons vu qu'en cas de fortes masses volumiques la vitesse de minéralisation était diminuée de sorte que le nitrate, substrat de la dénitrification, pourrait avoir tendance à limiter les pertes gazeuses. Pourtant, dans le modèle cet effet est masqué par la diminution du lessivage du nitrate, liée à la baisse de l'infiltrabilité, phénomène que l'on suppose excessif (cf la non ré-infiltration du lendemain). En bilan, même s'il est assez difficile de prédire *a priori* l'état azoté du sol en cas de tassement, la relation entre tassement et dénitrification semble dominer (Figure 2).

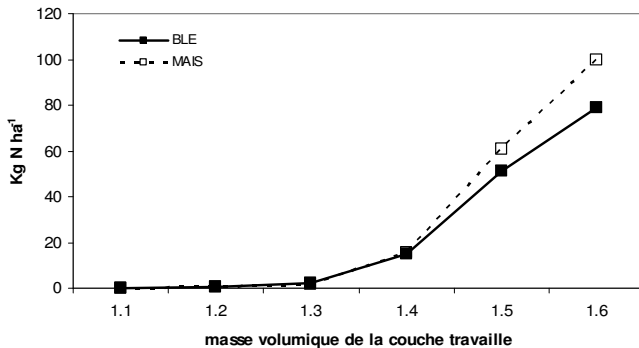


Figure 2 : Sensibilité de la dénitrification annuelle au tassement de la couche travaillée (exprimé par la masse volumique mais avec une modification conjointe des autres paramètres de structure) sur le sol de Mons pour un blé et un maïs et un potentiel de dénitrification de $7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$.

En lien avec les modifications de bilan hydrique et azoté du sol et avec la pénalisation de la croissance des racines apparaissent des stress hydrique et azoté dommageables pour les rendements. Cependant dans le cas des cultures d'été, la diminution de l'infiltrabilité occasionnée par le tassement peut temporairement leur être bénéfique en laissant davantage d'eau à la disposition des plantes.

Conclusion et perspectives

Ces travaux, de nature prospective, démontrent à la fois la complexité du problème de la prise en compte la structure du sol dans STICS mais aussi tout son intérêt pour être à même de bien représenter la réalité agricole. Autour des questions de structuration ou de dégradation des sols, les interactions sol-racine d'une part et eau-azote d'autre part sont nombreuses et s'établissent différemment selon les contextes climatiques. Le modèle ainsi configuré a été utilisé pour estimer l'influence du changement climatique sur les tassements des sols et ses effets (Echeverria, 2006).

Références

- Bradford K.J. (2002), *Weed Science*, 50: 248-260
Brisson N. et al., (1998), *Agronomie*, 18 : 311-346
Chanzy A., Bruckler L. (1993), *Water Resources Research*, 29: 1113-1125
Defosseux et al., (2003), *Geoderma*, 116 : 89-106
Durr C. et al. (2001), *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 65: 414-423
Echeverria I., (2006), rapport de stage, Université de Madrid
Mumen M., (2006), Thèse de doctorat de l'Université d'Avignon, 181 pp
Rebière B., (1996), Thèse de doctorat de l'ULP de Strasbourg, 214 pp
Roger-Estrade J. et al., (2004), *Soil & Tillage Research*, 79: 33-49
Viloint T., (2005), rapport de ESA Angers (stage IFA), 122 pages + annexes

Remerciements

Les auteurs remercient les programmes français GESSOL2 du Ministère en charge de l'environnement et ADD de l'Agence Nationale de la Recherche pour leur soutien au projet DST (Dégradation des Sols liée au Tassement) au sein duquel le travail a été effectué.

LE BILAN D'AZOTE DANS STICS : CE QUI Y EST ET CE QUI N'Y EST PAS

THE NITROGEN BALANCE IN STICS

B. Mary

INRA UR1158 Agronomie LRM, rue Fernand Christ 20007-Laon
mary@laon.inra.fr

Introduction

L'objectif de cette présentation est de rappeler les concepts de simulation des principaux processus liés au cycle de l'azote dans STICS et d'indiquer les atouts et limitations de la version STICS 6.

1. Le bilan N plante

1.1. L'absorption d'azote

L'absorption d'azote est modélisée en utilisant le concept "offre/demande". L'offre est calculée pour chaque couche de sol. Elle dépend du sol via le transfert vers la racine et de la plante via une capacité d'absorption potentielle du système racinaire. Le flux de transfert (convection et diffusion) varie selon la quantité d'azote minéral et la teneur en eau du sol. La capacité d'absorption dépend de la densité racinaire et de la concentration en azote minéral via 2 systèmes de transport (à forte et faible affinités). L'offre globale est la somme des offres par couche jusqu'à la limite inférieure du système racinaire.

La demande du peuplement est basée sur le concept de courbe "maximale" de dilution. Elle dépend de cette courbe (spécifique de chaque plante), de la vitesse de croissance du peuplement et de la biomasse déjà accumulée. L'absorption effective est égale au minimum de l'offre et de la demande.

L'effet du stress azoté sur la phénologie, la conversion du rayonnement, la croissance foliaire ou la sénescence est calculé en fonction de l'indice de nutrition azotée. L'indice retenu jusqu'à présent était l'indice classique cumulé (INN). La nouvelle version permet de considérer l'indice instantané (INNi), défini comme le rapport entre la vitesse d'absorption effective et la vitesse d'absorption "critique" (Mary et Guérif, 2005). Cette formulation doit permettre de mieux simuler l'effet de stress azoté (cf. poster Durand et al.).

1.2. La fixation symbiotique

L'absorption est simulée de la même façon pour les plantes fixatrices d'azote, mais en ajoutant à l'offre la fixation symbiotique. Celle-ci est modélisée en considérant une fixation potentielle fonction de la phénologie modulée par les facteurs du milieu (teneur en eau, température, anoxie, N minéral). L'azote minéral peut inhiber plus ou moins fortement la fixation d'azote. Cette description permet donc de simuler la possibilité pour la légumineuse d'être limitée ou excédentaire en azote.

2. Le bilan N sol

2.1. Les entrées d'azote sous forme minérale

Elles proviennent des engrais minéraux, des engrais organo-minéraux (ex: lisier), de la pluie et l'irrigation. Les apports N par la pluie sont le produit de la pluviométrie et de sa concentration moyenne en azote minéral, qui est supposée commune à tous les sites (fichier *param*). Il en est de même pour les apports par irrigation, excepté pour la teneur en N de l'eau d'irrigation qui est site spécifique (fichier technique).

Pour les apports N par les engrais minéraux, 8 types d'engrais minéraux sont considérés. L'efficacité d'utilisation de l'engrais pour la plante peut être soit imposée (par site), soit calculée en fonction du type de sol et d'engrais apporté. Dans ce dernier cas, on calcule de façon assez empirique les "pertes" qui se produisent par organisation microbienne, dénitrification et volatilisation aux dépens de l'engrais, en fonction du type de sol (pH), de la vitesse d'absorption de la culture, de la dose apportée et du type d'engrais. Le paramétrage de ces fonctions est basé sur quelques travaux de bilan d'azote faits avec marquage ¹⁵N de l'engrais. L'efficacité est le complément de ces pertes à 100%. Les pertes par organisation et volatilisation de l'engrais sont toujours calculées ainsi. Par contre, les pertes par dénitrification peuvent être calculées différemment, si l'on active l'option correspondante (annulant le calcul précédent).

2.2. Les entrées d'azote sous forme organique

Elles sont issues des résidus de culture aériens (récolte, chute de feuilles), des racines et rhizodépôts (récolte), des produits résiduels exogènes (fumier, lisier, boue, vinasse, ...). Tous ces

produits se décomposent et se minéralisent suivant le module de décomposition. Dans le cas d'un enchaînement de cultures, les caractéristiques des résidus de culture restitués au sol sont simulés et pris en compte pour la simulation suivante.

La chute des feuilles en cours de culture et leur décomposition en surface du sol peut être simulée, avec le même module. Le rapport C/N des feuilles au moment de leur chute est simulé en fonction de l'INN de la culture (Dejoux et al., 2000). Les autres résidus de culture (pailles, racines) sont supposés arriver au sol exclusivement à la récolte.

La biomasse de résidus racinaires et rhizodépôts (*BRR*) entrant dans le sol est calculée de 2 façons, selon l'option de croissance racinaire choisie. Avec l'option "profil type", *BRR* est supposée proportionnelle à la biomasse aérienne à travers un coefficient (*proprac*) qui est pour le moment unique dans le fichier *param*, donc identique pour toutes les cultures. Avec l'option "densité vraie", *BRR* est le produit de la longueur totale de racines émises (simulée) et de leur masse spécifique (constante, spécifique de la plante). Ces deux formulations présentent chacune leur inconvénient : dans le 1^{er} cas, *BRR* n'est pas indexé au type de plante ; dans le second cas, *BRR* est très sensible à la valeur de la masse spécifique qui est mal connue. Dans les 2 cas, la teneur en N affectée à cette biomasse souterraine est supposée égale à celle du reste des parties végétatives de la plante.

Enfin, les entrées de C et N par rhizodéposition devraient être simulées en continu pendant la culture. Ceci semble indispensable pour simuler le cycle C et N sous des cultures pérennes telles que des prairies (cf poster Ruget et Brisson).

2.3. La minéralisation

La minéralisation (N et C) résulte de la décomposition des matières organiques du sol. Elle est la somme de 2 composantes additives (pas de "priming effect") : la *minéralisation de la MO humifiée*, toujours positive, et la *minéralisation des résidus organiques*, la minéralisation d'azote pouvant être négative dans la première phase de décomposition.

La minéralisation de l'humus correspond au modèle AMG (Andriulo et al., 1999). La MO humifiée se compose de 2 fractions : une fraction "active" et une fraction "stable". Seule la première fraction participe à la minéralisation et à l'humification. La minéralisation de l'azote humifié dépend du stock d'azote organique actif et de la texture, de l'humidité et de la température du sol. Le stock N "actif" est le produit de la teneur en N organique du sol, de la densité apparente, de la profondeur de minéralisation (*profhum*) et de la fraction de MO active (1-*finert*). La fraction stable est supposée inerte (à l'échelle de la dizaine d'années). Sa valeur au début de la simulation (*finert*) est définie dans le fichier *param*. Elle peut varier entre 0.40 et 0.65 (Saffih et Mary, 2007). La valeur actuellement retenue est de 0.65 et le taux de minéralisation correspondant est $fmin1 = 0.65$.

La texture influe sur la vitesse de minéralisation, notamment via la teneur en argile qui ralentit le taux de minéralisation par unité de masse de N organique. La fonction hyperbolique actuellement utilisée semble globalement satisfaisante mais pourrait exagérer la minéralisation en sol très sableux. Nous proposons de la remplacer par une fonction exponentielle (Saffih et Mary, 2007).

La minéralisation varie avec les conditions de température et d'humidité. L'effet humidité est décrit par une fonction affine de la teneur en eau, l'effet température par une fonction exponentielle (Balesdent et Recous, 1997; Valé, 2006). Le produit de ces 2 facteurs donne le temps "normalisé".

Dans la version STICS 6, le travail du sol est supposé sans effet sur la vitesse de minéralisation de l'humus. Cette hypothèse permet de simuler l'installation du gradient de MO dans un sol sans labour, mais pas le stockage accru de MO. En fait, la version actuelle ne considère qu'une seule valeur de teneur en N organique du sol. Ceci peut convenir pour un sol labouré assez fréquemment, dont la teneur en MO est homogène (*profhum* pouvant alors être pris égal à la profondeur de labour), mais ne permet pas de bien décrire une situation de non labour permanent qui présente un très fort gradient de teneur en MO dans le profil. Il serait possible de simuler ces situations en distinguant une zone travaillée fréquemment et une zone peu ou pas travaillée dans le profil, chacune ayant sa constante de vitesse de minéralisation propre. Cependant cette description nécessite de fournir les valeurs initiales de teneurs en N organique, épaisseur et masse volumique de ces zones.

La minéralisation des résidus organiques est décrite de façon générique selon le modèle de Nicolardot et al. (2001). Les données requises sont les caractéristiques de chaque apport: catégorie, quantité apportée, teneur en carbone, rapport C/N, teneur en N minéral, profondeurs d'incorporation (fichier technique). Le paramétrage a été déterminé par ajustement à des cinétiques de décomposition obtenues en incubation au laboratoire.

La vitesse de décomposition des résidus et la minéralisation associée (N et C) dépendent de la nature des résidus organiques, de la température et de l'humidité du sol, de leur mode d'incorporation dans le sol. La nature des résidus est définie par leur origine et leur rapport C/N. 8 catégories de résidus organiques sont définies: résidus de culture principale (matures), de culture intermédiaire (jeunes), fumiers, composts, boues, vinasses, corne et autre. L'humidité du sol agit sur la décomposition des résidus selon la

même loi que l'humus, alors que la fonction température est différente de celle appliquée à la décomposition de l'humus (Balesdent et Recous, 1997).

Le travail du sol affecte la décomposition des résidus organiques en modifiant leur localisation dans le sol, ce qui change les conditions d'humidité et de température, ainsi que la quantité d'azote minéral disponible pour la biomasse microbienne. Dans la version actuelle, l'insuffisance d'azote minéral réduit l'organisation d'azote et la reminéralisation ultérieure, mais ne modifie pas la vitesse de décomposition. Ce dernier effet devrait être ajouté dans une prochaine version. Chaque opération de travail du sol est supposée mélanger uniformément les résidus sur une épaisseur de sol définie par une cote mini (*profres*) et une cote maxi (*proftrav*). Cette localisation verticale est nécessaire mais insuffisante pour simuler l'effet de la décomposition des pailles dans le sol (Beaudoin et al., 2007). Si l'on prend également en compte l'hétérogénéité horizontale de distribution de la paille, il est possible de très bien rendre compte des flux de carbone et d'azote : c'est ce qu'ont montré Oorts et al. (2007) avec le modèle Pastis. Cette hétérogénéité horizontale pourrait être simulée également dans le futur dans STICS en faisant de la simulation multi-1D (c'est le concept de "scènes hétérogènes" de C. Dupraz).

Le modèle de décomposition semble suffisant pour simuler la décomposition de résidus organiques peu ou pas "évolués" (type résidus de culture). Il apparaît toutefois insuffisant pour bien simuler la minéralisation du carbone et de l'azote de produits résiduels évolués (type boues, fumiers, composts) et de leur valeur humique. Une voie d'amélioration consiste à considérer au moins 2 fractions dans le résidu : une fraction labile et une fraction résistante, celle-ci pouvant être assimilée à l'humus et se décomposer à la même vitesse. Cette représentation devrait permettre d'améliorer nettement la prévision de la décomposition de ces produits. Elle pourrait être paramétrée sur la base de données "produits résiduels organiques" déjà constituée par S. Houot et coll. (Lashermes et al., 2007).

La décomposition d'un mulch végétal ou "paillis" est simulée indépendamment de la décomposition des autres MO. Le modèle de décomposition (exponentielle simple) utilisé pour ce paillis a pour seul objectif de prévoir la réduction de l'évaporation due à l'effet mulch au cours du temps et n'est pas connecté au bilan N et C dans le sol. On peut souhaiter que cette incohérence soit supprimée dans une prochaine version.

2.4. La nitrification

La nitrification est un processus souvent rapide dans les sols cultivés tempérés, ce qui peut justifier qu'on la considère comme instantanée (version 4), en utilisant l'option de calcul de l'efficacité de l'engrais. Cependant, elle doit être simulée si l'on modélise spécifiquement la volatilisation et/ou la dénitrification. De plus, la nitrification est un processus lent dans certaines conditions de milieux (sol acide, hydromorphe, sols tropicaux). On observe alors une persistance des ions ammonium, et le lessivage d'azote (qui ne concerne que la forme nitrique) est surestimé si l'on considère une seule forme d'azote minéral. La version 6 permet (en option) de simuler la nitrification et les quantités d'ammonium et de nitrate dans le sol.

La vitesse de nitrification de l'ammonium (issu de la minéralisation et des apports par les engrais minéraux et organiques) est simulée par une réaction d'ordre 1 par rapport à la quantité d'ammonium échangeable, avec une modulation par un effet pH, température et teneur en eau. Le paramétrage (voire même le formalisme) de ces fonctions (proposées en conditions de sol tropical par J. Sierra) demande à être ré-évalué pour les sols tempérés. Il faudrait notamment considérer une loi de type enzymatique avec une vitesse maximale de nitrification.

2.5. La volatilisation

La volatilisation d'ammoniac issue des engrais minéraux n'est pas simulée directement dans STICS. Elle est estimée de façon empirique via le calcul de l'efficacité de l'engrais. Par contre, la volatilisation de l'ammonium issu du lisier peut être simulée selon les algorithmes proposés par Morvan et Générmont. Il faut cependant noter que la description actuelle ne simule pas l'augmentation de pH qui se produit après l'apport, ni sa diminution au cours de la nitrification, alors que ces variations ont un effet important sur les pertes de NH_3 .

2.6. La dénitrification

La quantité totale d'azote dénitrifié ($\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2$) peut être estimée de façon empirique via le calcul de l'efficacité de l'engrais, ou simulée directement en activant l'option "dénitrification". Dans ce cas, le calcul est fait selon le principe du modèle NEMIS (Hénault et Germon, 2000). Le flux d'azote dénitrifié est le produit d'une vitesse potentielle de dénitrification sur une profondeur maximale (*vpotdenit* et *profdenit*, supposés constants pour tous les sols), et de 3 facteurs : la température, la concentration en nitrate et le taux de saturation en eau du sol. Ce dernier facteur dépend lui-même de la teneur en eau, de la densité apparente et de la densité de solide du sol. Le modèle est très sensible au taux de saturation et donc très sensible aux paramètres teneur en eau à la capacité au champ (borne supérieure de teneur en eau si on n'active pas l'option macroporosité) et densité apparente du sol. Il faut donc porter une grande attention aux propriétés physiques des sols (et aux fonctions de pédo-transfert) pour faire des simulations plausibles (Valé et al.,

2007; poster Durandea et al.). Le modèle doit maintenant être complété pour simuler les émissions de N₂O par dénitrification (via la prévision du rapport N₂O/N₂) ainsi que les émissions de N₂O par nitrification, tel que le propose le modèle NOE (Hénault et al., 2005). La prévision de la variation de la densité apparente en fonction du travail du sol (par tassement ou fragmentation) apparaît indispensable pour simuler la dénitrification et les émissions de N₂O. Elle devrait également faire l'objet d'une modélisation (cf. projet DST Gessol en cours).

2.7. Le lessivage

Le transfert de l'eau dans la microporosité du sol est calculé par couche élémentaire de 1 cm en utilisant une analogie de type réservoir. Le transfert de nitrate est également décrit par cette analogie, selon le principe des "cellules de mélange" : le nitrate arrivant par convection dans une couche se mélange avec le nitrate déjà présent et l'eau en excès repart avec la nouvelle concentration. En régime d'infiltration, cette description donne des résultats similaires au modèle de convection-dispersion, lorsque l'épaisseur des couches est égale au double de la dispersivité (Mary et al., 1999). Cette épaisseur était fixée à 1 cm dans la version 4. Dans la version 6, elle est paramétrable dans le fichier sol. Une augmentation de "l'épaisseur de dispersion" (*epd*) conduit à disperser davantage le nitrate dans le profil de sol : le lessivage apparaît plus rapidement et se prolonge plus longtemps.

Références

- Andriulo A, Mary B, Guéris J (1999) Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19: 365-377.
- Balesdent J, Recous S (1997) Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français. *Canadian Journal of Soil Science*, 77: 187-193.
- Beaudoin N, Launay M, Ponsardin G, Sauboua E, Mary B (2007) Evaluation of the crop model STICS for predicting crop production and nitrate leaching in arable fields during 8 years. Soumis à *European Journal of Agronomy*.
- Dejoux JF, Recous S, Meynard JM, Trinsoutrot I, Leterme P (2000). The fate of nitrogen from winter-frozen rapeseed leaves: mineralization, fluxes to the environment and uptake by rapeseed crop in spring. *Plant and Soil* , 218: 257-272
- Hénault C, Germon JC (2000) NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *European Journal of Soil Science*, 51: 257-270.
- Hénault C, Bizouard F, Laville P, Gabrielle B, Nicoulaud B, Germon JC, Cellier P (2005) Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology*, 11: 115–127.
- Lashermes G et al (2007) Apport de matières organiques exogènes en agriculture : indicateur de potentialité de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote. Rapport final ADEME, 78 pp.
- Mary B, Beaudoin N, Justes E, Machet JM (1999) Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soils using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50: 549-566.
- Mary B, Guéris M (2005) Effet du stress azoté sur la plante : définition d'un indice de nutrition instantané. Séminaire STICS, Carry-le-Rouet, 17-18 mars 2005, pp. 23-27.
- Nicolardot B, Recous S, Mary B (2001) Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*, 228: 83–103.
- Oorts K, Garnier P, Findeling A, Mary B, Richard G, Nicolardot B (2007a) Modelling soil carbon and nitrogen dynamics in no-tillage and conventional tillage systems using PASTIS model. *Soil Science Society of America Journal*, 71: 336-346.
- Oorts K., Laurent F., Mary B., Thiébeau P., Labreuche J., Nicolardot B. (2007b) Long-term effect of tillage systems on soil nitrogen mineralization under field conditions in Northern France. *Soil and Tillage Research*, sous presse.
- Saffih-Hdadi K, Mary B (2007) Modelling consequences of straw residues export on soil organic carbon. Soumis à *Soil Biology & Biochemistry*.
- Valé M (2006) Quantification et prédiction de la minéralisation nette en azote du sol in situ sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, 183 pp.
- Valé M., Mary B., Justes E. (2007) Irrigation practices may affect denitrification more than nitrogen mineralization in warm climatic conditions. *Biology and Fertility of Soils*, sous presse.

LES RENDISOLS DU DAHRA ET DU PLATEAU DE MOSTAGANEM (ALGERIE)

RENDISOLS OF THE DAHRA AND THE PLATE OF MOSTAGANEM (ALGERIA)

S. Belgat*, R. Loisel

*Laboratoire d'Agronomie faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur Mostaganem – Algérie

**Faculté des sciences et techniques St Jérôme Marseille

sacibelgat@yahoo.fr

Introduction

Cette étude s'inscrit dans un large programme de recherche sur les sols du littoral occidental et oriental d'Algérie. Il s'agit plus précisément de constituer une base de données STICS, pouvant servir de base à une cartographie des couvertures pédologiques.

Concernant la couverture pédologique du Dahra et du plateau de Mostaganem, sa configuration géo-stratigraphique et lithologique, nous conduit à mettre en vedette la topographie. En fait, ces sols obéissent à une distribution toposéquentielle. L'ouverture de fosses pédologiques sur l'axe de la toposéquence, combinée à la structure et à la composition du tapis végétal, établit correctement le lien génétique et les lignes de partage entre les principaux types de solums référentiels. Pour rendre compte des discontinuités des changements et hiatus latéraux des solums, nous avons fait appel à l'ouverture d'un nombre réduit de fosses (13), mais aussi à l'examen systématique des faces de talwegs, oueds, talus de chemins forestiers, etc.

Matériels et méthodes

Description des sols

Les fosses pédologiques sont soumises à un examen détaillé, aucun trait pédologique n'est laissé au hasard. Toutes les données sont consignées sur une fiche (STIPA – système de Transfert de l'information Pédologique et Agronomique), pour interprétation et consolidation des données quantitatives.

Méthodes d'analyse en laboratoire

Les méthodes d'analyse en laboratoire, physiques et chimiques, sont celles pratiquées dans le laboratoire de pédologie de la faculté des sciences et techniques de St Jérôme et référencées dans l'ouvrage de G. AUBERT (1978- CRDP MARSEILLE)

Résultats et interprétation :

Les sols du plateau de Mostaganem et du Dahra appartiennent au GER des Rendisols, deux grands types ont été individualisés.

Les rendisols polycycliques allochtones

Ils occupent une vaste étendue de la couverture pédologique du Dahra et apparaissent à la faveur du colluvionnement, interne, du plateau de Mostaganem. Ils se singularisent morphologiquement des fersols par :

- l'absence d'un horizon Fs,
- un faible taux d'argile (2 à 6,5%),
- la structuration d'un horizon induré en couches feuilletées, parfois diaclasés où s'accumulent les argiles de décarbonatation,
- un pourcentage en calcaire total qui dans l'ensemble est supérieur à 5%,
- le rapport fer libre/fer total bien que voisin de 0,5 est insuffisant pour exprimer une tendance à la rubéfaction.

Des colluviosols du référentiel pédologique 1995, ils se distinguent par l'absence d'un véritable horizon d'accumulation et en même temps, parce que génétiquement ils s'identifient en Méditerranée sud, par les horizons péto-calcaires à croûtes ou à encroûtements.

Classification décroissante des variables explicatives au seuil de 5% de l'ensemble des horizons

Variables explicatives	r positif	r négatif	r hautement significatif $r > 50$	r significatif $50 > r > 30$	r non significatif $30 > r > 0$
Argile	1	6	6	1	0
pH	1	6	0	4	3
Calcaire total	1	6	2	3	2
pF 2,5	0	7	3	1	3
pF 4,2	1	6	3	2	2
S méq/ 100g	0	7	4	3	0
T méq/100g	0	7	5	2	0
Ca++	0	7	3	2	2

Tableau N° 1 : variables explicatives de l'ensemble des horizons

Le tableau de classification des variables explicatives apporte les explications suivantes :

Les argiles affichent un taux de corrélation hautement significatif avec presque l'ensemble des variables explicatives. Ce caractère atteste de la place et du rôle des argiles dans la pédogenèse de ces sols. En somme cette variable identifie valablement l'horizon diagnostic des Rendisols allochtones.

Classification décroissante des variables explicatives des horizons diagnostics

variables	corrélations		® hautement significatif	® significatif	® non significatif
	® négatif	® positif	$r > 50\%$	$50\% < r > 30\%$	$r < 30\%$
N=8					
A	1	6	6	1	0
pH	1	6	0	4	3
Cal total	1	6	2	3	2
pF 2,5	0	7	3	1	3
pF 4,2	1	6	3	2	2
S	0	7	4	3	0
T	0	7	5	2	0
Ca ++	0	7	3	2	2

Tableau N° 2 : variables explicatives des horizons diagnostics

Les variables qui dégagent des taux de corrélations hautement significatifs avec plus de la moitié des variables explicatives sont toutes liées au complexe absorbant. En somme, ce sont ces variables qui justifient et expliquent en même temps le rattachement de ces solums au G E R des solums carbonatés et saturés.

Les Rendisols autochtones

Ces sols sont liés aux caractères lithologiques du plateau de Mostaganem, à encroûtement calcaire diaclasés.

Ils s'opposent aux rendisols polycycliques allochtones par :

- Les positions stationnelles qu'ils occupent dans les formations géomorphologiques.
- L'absence d'un horizon pédomorphologique à accumulation d'argiles.

Contrairement aux rendisols polycycliques allochtones, ils ne sont pas associés à des formations colluviales, ainsi les produits altérés sables et limons granulométriques proviendraient de la désagrégation altération in situ des roches diaclasées, et non d'un apport colluvial.

L'horizon Cca siège des altérations, ne diffère de l'horizon sous-jacent que par sa morphologie structurale. En ce sens il ne peut être assimilé comme dans les Rendisols polycycliques à un horizon allochtone.

Classification des variables explicatives des horizons A1, A11 et A12

Tableau N°3 : variables explicatives des horizons A1, A11 et A12

Variables explicatives	corrélations		® hautement significatif	® significatif	® non significatif
	® négatif	® positif	r > 50%	50% < r < 30%	r < 30%
N= 16					
L.F	0	15	5	4	6
L.G	7	8	6	1	8
S.F	5	10	1	7	7
S.G	10	5	4	2	9
pF2, 5	5	10	5	2	8
pF4, 2	4	11	5	1	9
Calcaire total	8	7	6	3	6
Calcaire actif	9	6	4	1	9
pH	10	5	2	3	10
S	5	10	4	3	8
T	5	10	4	3	8
Ca ++	6	9	5	2	8
Mg++	5	10	0	6	9
N	6	9	1	8	6
C	7	8	4	1	10
C/N	6	9	6	2	7

Tableau N°3 : variables explicatives des horizons A1, A11 et A12

Tous les résultats quantitatifs et qualitatifs et les interprétations qui en ont découlé, confirment l'appartenance de ces sols au Rendisols autochtones encroûtés. Ce type de sols peut être reconnu par :

- Une horizonation de type A-Cca-R ou M
- Un taux de calcaire > 10%
- Une couverture pédologique dominée par des croûtes et des encroûtements diaclasés.

Conclusion

Vu que les deux groupes sont très proches génétiquement et ne se différencient que par leur appartenance à des roches matrimoniales de deux origines, nous avons recouru au test de comparaison des moyennes de Fischer afin de déterminer si des variables quantitatives liées à la roche matrimoniale appartiennent à deux échantillons indépendants. Ce test a pour valeur de confirmer d'un point de vue mathématique la validité de la thèse de l'allochtonie et de l'autochtonie. Le test de comparaison des moyennes de Fischer est correct pour le pH et le calcaire actif. Les variables quantitatives significatives au seuil de 1% et de 5% de la loi de Student sont celles qui sont liées à l'horizon pétrocalcarique Km, des Rendisols. Dans le cas des Rendisols allochtones du Dahra le caractère carbonaté de la solution du sol est masquée, ce qui n'est pas le cas des Rendisols autochtones du plateau de Mostaganem ; il en est de même de la capacité hydrique, exprimée ici par les potentiels de force au pF 2,5 et 4,2, qui dans le cas des Rendisols allochtones sont favorisées par les diaclases et les argiles d'héritage.

A ce stade on peut retenir définitivement ces deux types et associer aux critères morphopédologiques de classification les variables quantitatives sus citées

Références

- S. Belgat (1999) le littoral Algérien Climatologie, pédologie, syntaxonomie, édaphologie et relations sol- végétation 259 pages (Institut National d'Agronomie- Alger)

afes: référentiel pédologique (1995) I N R A EDITIONS, 332 pages

FORÇAGE D'UNE HAUTEUR DE NAPPE ET DE SA CONCENTRATION EN NITRATE DANS STICS

FORCING THE GROUNDWATER LEVEL AND ITS NITRATE CONCENTRATION IN STICS

G. Jégo^{(1)*}, N. Brisson⁽²⁾, M. Launay⁽²⁾, D. Ripoche⁽²⁾, S. Sauvage⁽¹⁾, J.M. Sanchez-Pérez⁽¹⁾, E. Justes⁽³⁾

⁽¹⁾Laboratoire d'écologie fonctionnelle, UMR 5245, CNRS-UPS-INP-ENSAT, Toulouse, France.

⁽²⁾Unité Climat, Sol et Environnement INRA, Avignon, France.

⁽³⁾Unité Agrosystèmes et développement territorial, UMR 1248, INRA-INP-ENSAT, Toulouse, France
EcoLab 29 Rue Jeanne Marvig BP 24349 F-31055 Toulouse cedex 4 ; guillaume.jego@cict.fr

Introduction

L'utilisation du modèle de culture STICS peut se révéler inadapté dans certaines situations où le niveau de nappe remonte jusqu'à la zone racinaire. En effet, en évaluant STICS sur des expérimentations de culture de pomme de terre (Sanchez Perez et al., 2003), le modèle s'est révélé incapable de correctement simuler les quantités d'eau et d'azote du sol lorsque le niveau de nappe remonte jusque dans les horizons simulés. Cette saturation des horizons superficiels peut avoir plusieurs effets sur le fonctionnement du système sol-plante, notamment une anoxie, ainsi qu'une modification importante des quantités d'azote minéral des horizons de sol saturés. Le forçage de la hauteur de nappe et de la concentration en nitrate de la nappe est une voie de modification de STICS qui a été envisagée pour permettre de prendre en compte ces phénomènes et donc d'améliorer la qualité des simulations de STICS dans les cas où la nappe sature les horizons superficiels, même temporairement sur le cycle cultural.

Le fonctionnement actuel de STICS

Dans son fonctionnement actuel, en activant la macroporosité, STICS peut gérer les variations du niveau de nappe. Ce niveau de nappe va être calculé en fonction de la quantité d'eau dans la macroporosité (Brisson et al., 1998). Cette quantité d'eau de la macroporosité est nommée « excès » et va être affectée pour chaque horizon. Le niveau de nappe va fluctuer d'une part en fonction des précipitations et d'autre part par l'éventuelle activation des remontées capillaires. L'activation de celle-ci nécessite le renseignement d'une quantité d'eau en mm (« capiljour ») qui va remonter systématiquement chaque jour. Cette quantité est fixe et donc identique tous les jours de la simulation, et aucune concentration en nitrate ne lui est associée.

Les modifications apportées

Nous avons choisi de proposer des modifications de façon à pouvoir lire un fichier d'entrée contenant les hauteurs de nappe et les concentrations en nitrate associées provenant de mesures piézométriques ou de sorties de modèle hydrologique. La hauteur de nappe étant transformée ensuite dans le modèle en une quantité d'eau semblable aux remontées capillaires qui étaient déjà simulées. Pour cela, des modifications de formalisme du module de transfert d'eau et de nitrate ont été proposées. D'un point de vue pratique, il est nécessaire d'activer la macroporosité et de mettre une infiltrabilité nulle à la base du dernier horizon. Ceci est nécessaire afin d'empêcher que l'eau apportée pour le forçage de la hauteur de nappe soit drainée immédiatement à la base du profil. Ensuite, il faut activer les remontées capillaires et mettre une humidité minimale (humidité pondérale en %) pour l'activation des remontées capillaires (« humcapil ») très élevées (par exemple de 50%), afin de ne pas limiter les remontées capillaires.

La première étape des modifications de formalisme a consisté en la lecture du fichier d'entrées qui contient pour chaque jour de la hauteur de nappe (« hautnappe ») et la concentration en nitrate de l'eau (« concnitnappe »). La hauteur de nappe est exprimée en centimètre par rapport au niveau du sol et la concentration en nitrate en mg de nitrate par litre. Il est à noter que la lecture de ce fichier d'entrées est conditionnée par l'activation de « codeleccapil ». Dans le cas contraire, STICS fonctionne normalement et aucune des modifications proposées ne produit d'effet.

La seconde étape concerne le calcul de la quantité d'eau à injecter ou à retirer dans le profil (« capiljour ») pour atteindre le niveau de nappe forcé (« hautnappe ») (fig.1). Lorsque le niveau de nappe augmente cette quantité d'eau prend en compte la saturation à la capacité au champ de la microporosité ainsi que la saturation jusqu'à l'humidité à saturation de la macroporosité. Lorsque le niveau de nappe diminue cette quantité correspond à l'eau contenue dans la macroporosité comprise entre l'ancienne hauteur de nappe et la nouvelle.

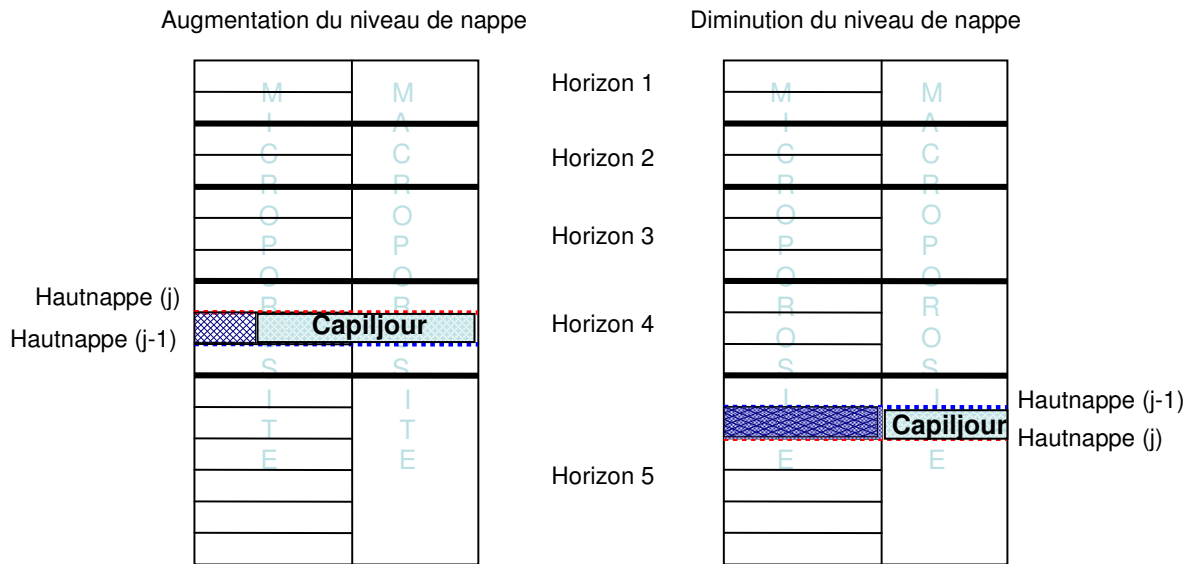


Fig.1 : Calcul de la quantité d'eau entrant dans le profil (« capiljour ») pour atteindre la hauteur de nappe imposée (« hautnappe »)

La troisième étape consiste, lorsque le niveau de nappe augmente, en la répartition de la quantité d'eau précédemment calculée, dans la microporosité et la macroporosité. En effet, la quantité d'eau calculée à l'étape précédente et d'abord injectée dans la macroporosité, puis une partie est ajoutée à la microporosité (Fig.2). Lorsque le niveau de nappe diminue, cette quantité d'eau est retirée de la macroporosité, laissant ainsi la microporosité à la capacité au champ.

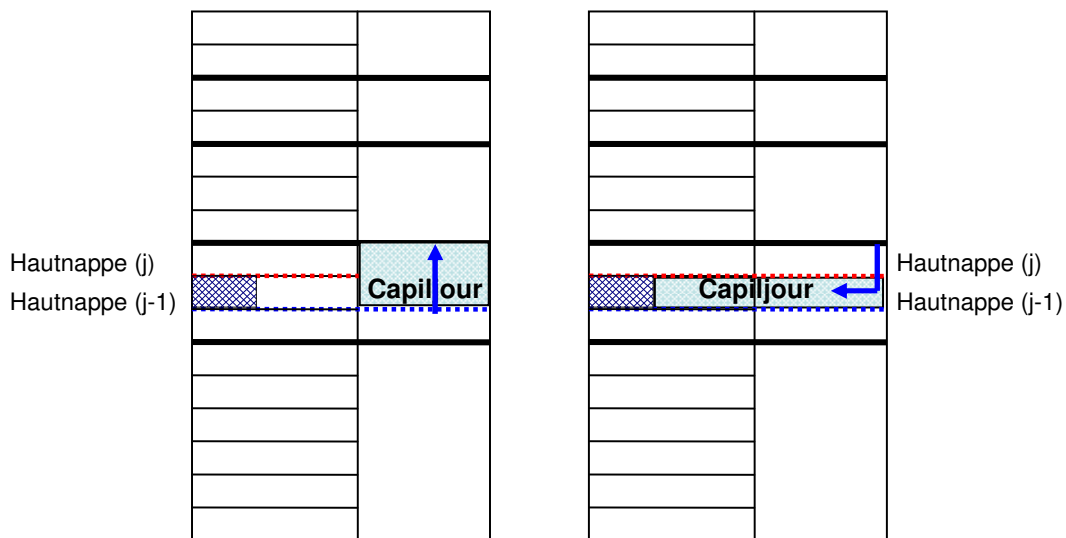


Fig.2 : Répartition de la quantité d'eau calculée dans la macroporosité et la microporosité lorsque le niveau de nappe augmente.

Enfin, une concentration en nitrate est associée à ces flux d'eau. L'hypothèse retenue ici est que lorsque le niveau de nappe remonte la concentration en nitrate des horizons de sol saturé est celle mesurée dans la nappe. La concentration en nitrate de la nappe est donc forcée chaque jour pour l'ensemble de la microporosité située dans la zone saturée. Cette concentration doit être indiquée en mgNO₃/L en donnée d'entrée mais elle est transformée en kg N/ha. Dans la configuration actuelle la concentration est forcée par celle provenant des concentrations mesurées en nitrate de la nappe. Cette concentration prend donc en compte le mélange entre les nitrates de l'eau de la nappe et ceux de la microporosité du sol. En effet il a été montré que les variations du niveau de la nappe affectent les concentrations en soluté (Brouyère et al., 2004)

Conclusion

Les modifications de formalisme ont été validées sur un jeu de données numérique. Par contre, il reste à évaluer l'impact de ces modifications de formalisme sur des données expérimentales afin de vérifier si elles permettent d'améliorer les résultats des simulations de STICS dans les conditions où le niveau de nappe remonte jusque dans la zone racinaire. Ceci nécessite pour l'instant de connaître les hauteurs de nappe et sa concentration en nitrate pour l'ensemble de la période de simulation. Dans un second temps, le couplage externe avec un modèle hydrogéologique est envisagé. Ceci devrait, à terme, permettre de disposer d'un modèle couplé capable de prédire les variations temporelles de concentrations en nitrate dans la nappe en interaction avec l'occupation du sol et les itinéraires techniques utilisés.

Références

- 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.
- Brouyere S., Dassargues A., Hallet V. (2004) Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation. *Journal of Contaminant Hydrology* **72**(1-4): 135-164.
- Sanchez-Pérez J.-M., Antiguada I., Arrate I., Garcia-Linares C., Morell I., (2003) The influence of nitrate leaching through unsaturated soil on groundwater pollution in an agricultural area of the Basque country: a case of study. *The Science of the Total Environment* **317**: 173-187.

INNOVATION DANS LE MODULE DE LEVEE DE STICS, APPLICATION AU QUINOA

INNOVATION IN THE EMERGENCE MODULE OF STICS, APPLICATION TO QUINOA

S. Lebonvallet¹, J.P. Rodriguez Calle, N. Brisson

¹ Unité Agroclim, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914, Avignon cedex 9
sophie.lebonvallet@avignon.inra.fr

Introduction

La réussite de la germination puis de la levée détermine la mise en place du peuplement végétal et conditionne donc généralement le succès d'une culture. Dans les milieux très limitants (secs et/ou froids), la germination et l'émergence des semences est la première phase critique cruciale de cette implantation. Les quelques centimètres de sol qui constituent le lit de semences, directement placés à l'interface sol-atmosphère, sont en effet particulièrement affectés par les conditions climatiques. Les variations hydriques et thermiques importantes se produisant dans ces horizons superficiels peuvent ainsi être à l'origine de retards de cinétiques d'imbibition et de germination ainsi que de diminutions de taux de germination et de levée. Il est donc particulièrement intéressant de décomposer la levée afin d'identifier les facteurs limitants du climat qui peuvent varier selon les années et les situations climatiques.

On applique ici cette étude à la culture du quinoa, pseudo céréale andine, sur l'Altiplano bolivien, milieu particulièrement difficile marqué par de nombreux épisodes de gel, de sécheresse ou de grêle. La courte fenêtre climatique laissée pour le cycle de culture rend en particulier délicate la phase d'implantation du quinoa, d'une part car les conditions au semis sont limitantes et d'une grande variabilité interannuelle, entraînant ainsi des densités de levée parfois très faibles, d'autre part car une levée trop tardive soumettrait les plantes en fin de cycle à des gelées trop importantes, compromettant ainsi le rendement.

Description des formalismes

Humectation

L'imbibition de la graine peut être considérée comme un phénomène passif se produisant à partir d'une certaine humidité (exprimée en potentiel d'eau dans le sol) du lit de semences, paramétrable pour chaque espèce par HUMECCGRAINE_p (en MPa). A partir du moment où la graine est humectée, elle dispose d'un nombre limité de jours d'« autotrophie¹ » lié à ses réserves et donc dépendant de l'espèce (NBJGERLIM_p). Ce paramètre dépend également de la température car on considère qu'à basse température la graine a une « autotrophie » plus grande qu'à température élevée (plus la température augmente, plus la graine respire et utilise ses réserves rapidement).

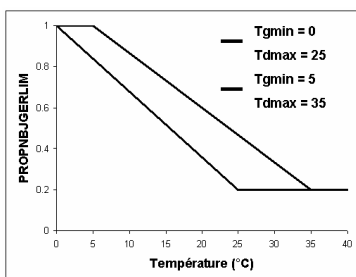


Figure 1 : Simulation de la proportion du nombre de jours d'autotrophie de la graine après humectation en fonction de la température.

Lorsque la température est inférieure à la température de base de germination (T_{gmin}), alors le nombre de jours est maximal ($NBJGERLIM_p$). Au-delà de T_{dmax} , la graine épuise ses réserves consacrées à la mise en place du métabolisme en un temps minimum (paramétré ici à 20% du temps maximal). Entre les deux, le nombre de jours d'autotrophie décroît linéairement avec la température.

Germination

La germination se produit lorsque la somme de température depuis le semis dans le lit de semence (SOMGER) atteint une valeur seuil ($STPLTGER_p$), SOMGER étant pondérée par une condition sur l'état hydrique du sol (HUMIRAC) par le biais du paramètre $SENSRSEC_p$ qui détermine la sensibilité de la plante à la sécheresse.

¹ Terme utilisé ici abusivement pour exprimer le temps maximal entre l'imbibition et la sortie de la radicule, caractérisant le démarrage visible de la croissance.

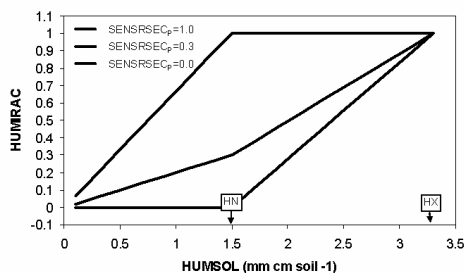


Figure 2 : Evolution de la variable HUMIRAC en fonction du paramètre SENSREC

Lorsque le paramètre SENSREC est à 1, la sécheresse du sol ne commence à avoir un effet que lorsque la teneur en eau devient inférieure au point de flétrissement (HN). Dans les autres cas, toute diminution sous la capacité au champ (HX) est prise en compte.

Tant que la graine n'est pas humectée, il n'y a pas de contrainte de temps sur la germination. En revanche, dès que l'imbibition commence, un temps de germination trop long ($NBJHUMEC > NBJGERLIM_p(T^\circ)$) aura un impact sur le pourcentage de germination (Bradford, 1995 et Bradford, 2002), et se traduira par des manques à la germination proportionnellement au déficit en temps thermal :

$$DENSITE_{germ} = DENSITE_{sem} \cdot \frac{SOMGER}{STPLTGER}$$

Levée

A la germination démarrent les croissances de la tige et des racines, la vitesse de croissance de la tige étant une fonction logistique de la somme de températures du sol pondérée par la variable HUMIRAC. L'émergence se produit lorsque l'élongation de la tige (ELONG, pilotée par une élongation maximale qui dépend de l'espèce, $ELMAX_p$) devient supérieure à la profondeur de semis. De même que pour la germination, si le temps entre la germination et la levée, spécifique de chaque espèce ($NLEVLIM1_p$ et $NLEVLIM2_p$), est trop long, alors cela se traduit par des manques à la levée :

$$DENSITE_{levée} = DENSITE_{germ} \cdot COEFLEV$$

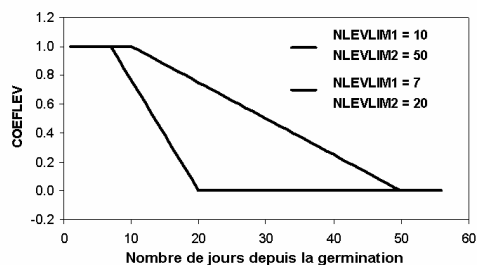


Figure 3 : Simulation de la proportion de densité de levée en fonction de la durée entre germination et levée

Si la levée se produit rapidement, avant le nombre de jours NLEVLIM1, alors le pourcentage de levée sera maximal. Il diminue ensuite linéairement jusqu'à être nul après une durée trop importante (NLEVLIM2).

Paramétrisation

Quinoa

Les valeurs des différents paramètres évoqués précédemment ont été déterminées pour le quinoa d'après la bibliographie et par analyse de sensibilité à partir de données expérimentales mesurées. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

paramètre	unité	valeur	source
Tgmin	°C	0	Bois et al., 2006
Tdmax	°C	23	Dires d'experts
HUMECGRAINE	MPa	-2.4	Bradford, 2002
NBJGERLIM	jours	10	Bradford, 2002
STPLTGER	*j	30	Jacobsen, 1998
SENSRSEC	-	0	Analyse de sensibilité
ELMAX	cm	15.5	Analogie autre culture
NLEVLIM1	jours	10	Dires d'experts
NLEVLIM2	jours	60	Dires d'experts

Tableau 1 : Détermination des paramètres de germination et de levée pour le quinoa

La plupart des paramètres ont été déterminés par la bibliographie. ELMAX a été déterminé par rapport au paramétrage de la moutarde, dont la taille de la graine est similaire. SENSRSEC a été déterminé par analyse de sensibilité.

Comparaison avec une culture de printemps en conditions européennes : le maïs

Afin de comparer la diversité des conditions climatiques et des facteurs limitants, nous avons choisi de simuler la levée du quinoa en conditions altiplaniques et en conditions européennes, où le quinoa serait

une culture de printemps. A titre indicatif son comportement sera donc comparé à celui du maïs.

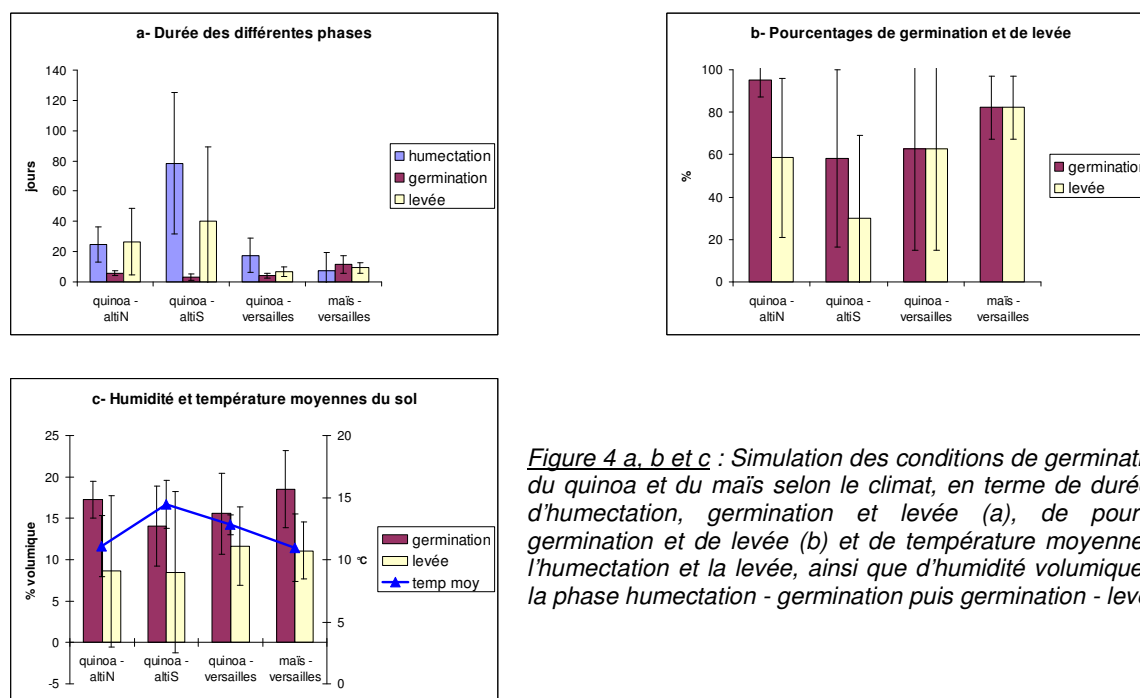
paramètre	unité	valeur	source
Tgmin	°C	8	STICS
Tdmax	°C	28	STICS
HUMECGRAINE	MPa	-1.6	Bruckler, 1991
NBJGERLIM	jours	15	Bruckler, 1991
STPLTGER	*j	35	STICS
SENSRSEC	-	1	STICS
ELMAX	cm	8	STICS
NLEVLIM1	jours	10	STICS
NLEVLIM2	jours	50	STICS

Tableau 2 : Paramètres de germination et de levée du maïs

On reprend pour le maïs la paramétrisation déjà présente dans STICS. Les paramètres HUMECGRAINE et NBJGERLIM sont déterminés par les travaux de Bruckler (1991) sur la germination du maïs en conditions sèches

Application à différents climats

Nous avons testé quatre situations différentes : quinoa altiN, quinoa altiS, quinoa Versailles, maïs Versailles. Sur l'altiplano, les semis ont lieu le 1^{er} septembre, à Versailles le 1^{er} avril, et les profondeurs de semis sont choisies identiques (3 cm). Aucune irrigation n'est apportée. Les résultats sont présentés ci-dessous.



	Humectation	Germination	Levée
Quinoa – altiN	★★	★	★★
Quinoa - altiS	★★★★	★★	★★★★
Quinoa - Versailles	★★	★★	★
Mais - Versailles	★	★★	★

Tableau 3 : Niveau de contraintes sur chacune des phases (de 1 : peu limitante à 3 : très limitante)

En moyenne, c'est l'humidité du sol qui a été la plus limitante sur l'altiplano, et la température à Versailles. En raison de ces humidités faibles on obtient des durées de phases d'humectation et de levée nettement plus élevées et plus variables dans les conditions altiplaniques que dans celles de Versailles, ce qui se traduit par des pourcentages de levée plus faibles. A Versailles c'est en revanche la germination qui peut être légèrement limitante, car l'humidité du sol étant un peu plus élevée la graine peut être humectée à un moment où la température encore faible va ralentir sa germination, et finalement la réduire. Dans le cas du maïs, la baisse du pourcentage de germination est due essentiellement à l'absence d'adéquation entre la date de semis et l'état hydrique du sol (parfois compensée par une irrigation).

L'option « décision semis » permet de repousser la date de semis tant que les conditions de

température et d'humidité requises (paramétrables) ne sont pas atteintes.

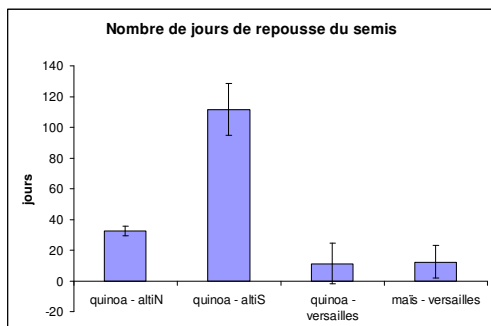


Figure 5 : Utilisation de l'option « décision semis » pour déterminer une date optimale de semis par rapport aux conditions climatiques.

Il faudrait repousser le semis d'environ 1 mois sur l'altiplano nord, 3-4mois sur l'altiplano sud (soit fin décembre – début janvier : début de la saison des pluies), et 10 jours sur Versailles.

Conclusion et perspectives

On voit bien l'intérêt de l'adaptation de cette décomposition de la levée aux conditions particulièrement limitantes de l'Altiplano bolivien. Elle permet également par un choix approprié des paramètres de rendre compte des différences entre espèces et entre type de climat.

Les résultats donnés par l'option « décision semis » pour l'altiplano sud ne sont pas réalisables, car un semis précoce (fin août début septembre) est nécessaire pour éviter les gelées de fin de cycle (à partir du mois d'avril). Dans la pratique, il faut jouer sur les techniques culturales (labour, profondeur de semis par le biais d'un semis en poquet, dates de semis,..., non simulées ici) afin de mieux s'adapter aux conditions climatiques.

Références

- Bradford K.J. (1995) Water relations in seed germination. In: Kigel J., Galili G., eds. Seed Development and Germination. New York, Etats-Unis : Marcel Dekker, 351-396.
- Bradford K.J. (2002) Applications of hydrothermal time to quantifying and modelling seed germination and dormancy. Weed Science, 50: 248-260.
- Bois J.F., Winkel T., Lhomme J.P., Raffaillac J.P., Rocheteau A. (2006) Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effets on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*, 25: 299-308.
- Bruckler L., Bouaziz A. (1991) La germination des semences en conditions sèches. *Sécheresse*, 2: 239-249.
- Jacobsen S.E. (1998) The influence of temperature on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed Sci. & Technol.*, 26: 515-523.

PROTOCOLE D'ESTIMATION DES PARAMETRES INFIL, Q0, CFES, ET ZESX POUR DIFFERENTS SOLS PAR UTILISATION INVERSE DU MODELE STICS PROTOCOL OF ESTIMATION OF THE PARAMETERS INFIL, Q0, CFES, AND ZESX FOR VARIOUS SOILS BY INVERSE METHODE OF THE MODEL STICS

M. Lefebvre*, **G. Richard***, **C. Le Bas****, **A. Chanzy*****, **N. Brisson******

* INRA, UR0272 Unité Science du Sol, 2163 Avenue de la Pomme de Pin - B.P. 20619-Ardon,
F-45166 Olivet marie-pierre.lefebvre@orleans.inra.fr

** INRA, InfoSol, 2163 Avenue de la Pomme de Pin - B.P. 20619-Ardon, F-45166 Olivet

***INRA, UMR Climat Sol et Environnement, Domaine St Paul, 84914 Avignon Cédex 9

****INRA, Unité AGROCLIM, Domaine St Paul Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

Introduction

Le tassement des sols, lors des passages d'engins, est, avec l'érosion, un processus majeur de dégradation physique des sols. Cette dégradation concerne la totalité du territoire français du fait de la généralisation de la mécanisation. Elle a des effets négatifs sur les productions agricoles et forestières et sur l'environnement : baisse du rendement, augmentation de la lixiviation des nitrates via la limitation de l'enracinement, augmentation des émissions de N₂O via les conditions anoxiques dans le sol, augmentation du ruissellement et de l'érosion via la réduction de l'infiltrabilité. Il est important de connaître l'ampleur de la dégradation des sols liée au tassement en fonction de leur régime hydrique, de leur utilisation, de leur nature et du changement climatique afin de chercher à la prévenir. L'objectif du travail présenté est de réaliser des simulations sur l'ensemble du territoire français à l'aide du modèle STICS afin de déterminer les teneurs en eau journalières des sols lors des passages d'engins. Les valeurs de teneur en eau obtenues nous permettront d'évaluer l'intensité du tassement et d'en prévoir son extension spatiale.

Pour cela, nous proposons d'estimer les paramètres de STICS qui influencent la variation de la teneur en eau, à savoir *infil*, *q₀*, *cfes* et *zesx*, pour des sols français représentatifs. Nous utiliserons STICS en méthode inverse sur des données de teneur en eau calculées à l'aide du modèle HYDRUS-1D, lui-même paramétré grâce à des fonctions de pédotransfert. Afin d'estimer au mieux les valeurs de ces paramètres, il est nécessaire de connaître leurs valeurs limites. Le but du travail présenté ici a donc été de déterminer ces limites d'après les simulations réalisées par HYDRUS-1D à partir des fonctions de pédotransfert de Wösten (1997).

Matériels et méthodes

La base de données géographique des sols de France au millionième (INRA, 2005)

Nous cherchons à définir les principaux types de sols français, quant au risque de tassement, par le regroupement de plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS) sur la base de quatre critères présents dans la base: (1) texture en surface, (2) texture en profondeur, (3) profondeur du changement de texture (4) profondeur du sol, auxquels nous souhaitons ajouter cinq autres critères, calculables par des règles de pédotransfert : (5) teneur en calcaire, (6) teneur en cailloux, (7) hydromorphie, (8) capacité d'échange cationique et (9) teneur en carbone. Ces regroupements définissent des Super UTS (SUTS) qui seraient représentatives des grands types de sols que l'on rencontre en France.

Les fonctions de pédotransfert de Wösten (1997)

Wösten (1997) a établi des fonctions de pédotransfert (FPTs) afin de calculer les paramètres θ_s , θ_r , K_{sat} , α , l , n du modèle de Van Genuchten (1980) relatif aux propriétés hydrodynamiques des sols (teneur en eau et conductivité hydraulique en fonction du potentiel). θ_s est la teneur en eau à saturation, θ_r est la teneur en eau résiduelle du sol, K_{sat} est la conductivité hydraulique à saturation, α et n sont des paramètres d'ajustement de l'équation, l est un paramètre qui prend en compte les relations entre les écoulements et la tortuosité. Ces six paramètres correspondent aux données d'entrée du modèle HYDRUS-1D.

Le modèle HYDRUS-1D (Simunek et al., 2005)

HYDRUS-1D a été développé par le Département des Sciences Environnementales à l'Université de Riverside en Californie (USA). Il permet de simuler les écoulements monodimensionnels de l'eau dans un milieu poreux variablement saturé. Le modèle discrétise l'espace en éléments finis et applique l'équation de transfert de Richards. Dans ce travail, HYDRUS-1D nous permettra d'estimer la teneur en eau dans les différentes SUTS pour des climats très contrastés. On obtient, ainsi, la gamme de variation des paramètres

à estimer.

Le modèle STICS (Brisson et Perrier, 1991)

STICS permet de décrire l'évolution du système sol-plantes sous l'effet du climat, du type de sol et du système de culture. Il peut fonctionner en version sol nu, auquel cas, seule l'évaporation du sol intervient comme flux ascendant. Elle est simulée en utilisant le modèle de Brisson et Perrier (1991) combiné à une distribution exponentielle de l'eau prélevée avec la profondeur (Mary et al., 1999). La circulation de l'eau dans la microporosité (correspondant à la capacité au champ) se fait par débordement en cascade dans des couches de 1 cm, tandis que la circulation dans la macroporosité utilise la notion d'infiltrabilité et une discrétisation par horizons agro-pédologiques grâce au programme d'exécution inverse de STICS, il est possible d'estimer les paramètres d'entrée du modèle. Les quatre paramètres recherchés (*Infil*, *cfes*, *zesx* et *q0*) influencent le taux d'infiltration et d'évaporation de l'eau dans le sol. Le paramètre *Infil* correspond à la quantité maximale journalière d'eau infiltrée à la base de l'horizon, le paramètre *cfes* est le coefficient de courbure de la contribution à l'évaporation de chaque horizon de sol, le paramètre *zesx* représente la profondeur maximale à laquelle l'évaporation affecte le sol, le paramètre *q0* correspond à la quantité d'eau évaporée, cumulée à partir d'un événement pluvieux, au moment où l'évaporation journalière devient inférieure à l'ETP.

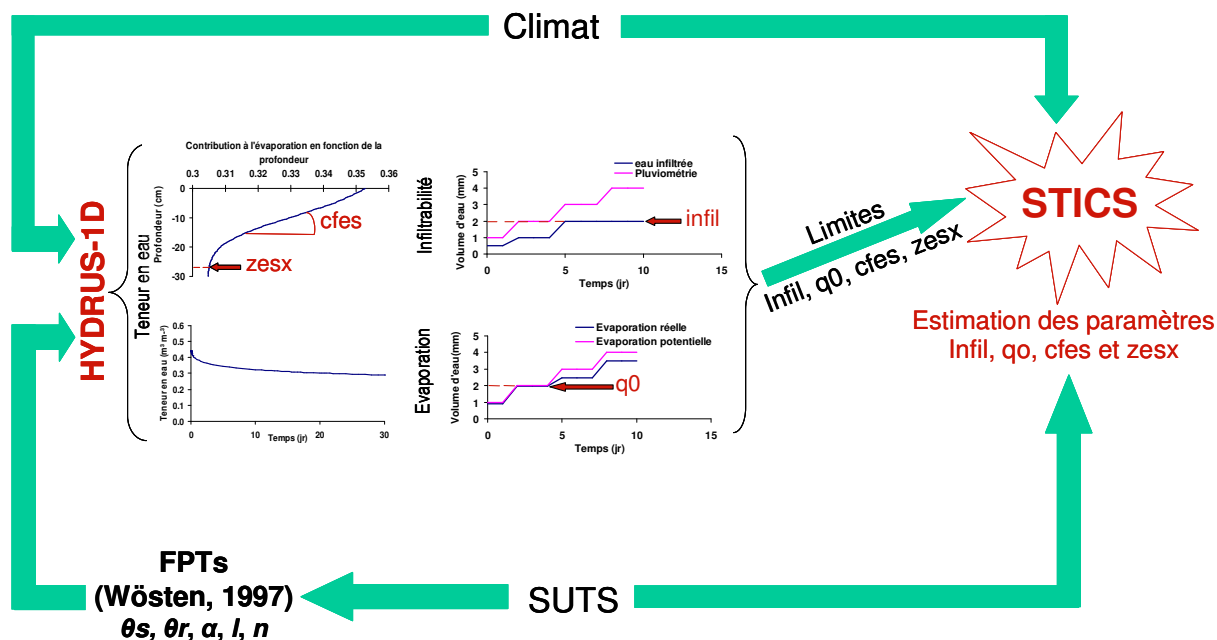


Figure 1 : Méthodologie pour estimer les paramètres *infil*, *cfes*, *zesx* et *q0* de STICS.

Méthodologie

Les fonctions de pédotransfert de Wösten (1997) nous permettent d'estimer les propriétés hydrodynamiques de chacune des SUTS. En initialisant les simulations d'HYDRUS-1D avec ces propriétés hydrodynamiques, les données de sortie obtenues avec HYDRUS-1D que nous utilisons sont :

- La quantité d'eau évaporée en fonction du temps
- La quantité d'eau infiltrée en fonction du temps
- La teneur en eau en fonction de la profondeur.

L'analyse de ces données nous permet de renseigner les limites des paramètres *infil*, *cfes*, *zesx* et *q0* dans le modèle STICS afin de lui permettre une meilleure convergence vers une solution optimale. La technique d'optimisation de STICS s'appuie sur l'algorithme du simplexe. Le critère de convergence utilisé est le moindre carré avec un calcul des paramètres de plus ou moins 20% autour des valeurs initiales. Lorsque la Racine Carrée de l'Erreur quadratique Moyenne (RMSE) est inférieure à 10^{-4} , le modèle converge vers cette solution.

Premiers Résultats

Les simulations HYDRUS-1D ont été réalisées pour le sol de Mons-en-Chaussée (Picardie) en vue d'estimer la gamme de variation des paramètres *cfes*, *zesx* et *q0* (figures 2 et 3).

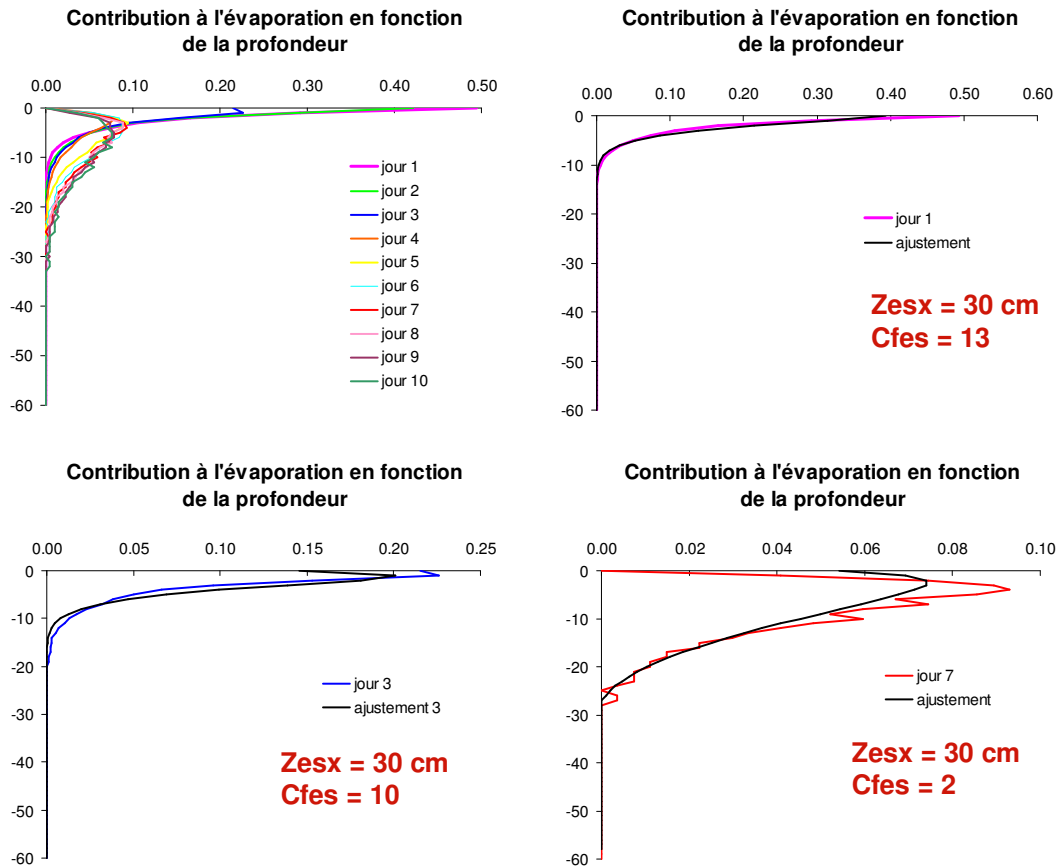


Figure 2 : Estimation des paramètres z_{esx} et c_{fes} par ajustement de l'équation de la répartition de l'évaporation implémentée dans STICS (Brisson et Mary, 2002). Simulations réalisées avec HYDRUS-1D sur sol de Mons à une masse volumique constante de 1.3 g cm^{-3} sur 60 cm d'épaisseur. Pas de précipitation et une ETP de 1 mm jr^{-1} pendant 10 jours.

Les ordres de grandeur des paramètres c_{fes} et z_{esx} sont du même ordre de grandeur que ceux proposés actuellement dans STICS pour le sol de Mons. En effet, l'analyse des simulations avec HYDRUS-1D, pour un climat sec (Précipitation nulle, Evapotranspiration de 1 mm jr^{-1}) et un sol initialement proche de la capacité au champ (potentiel de -100 hPa) montrent des valeurs de c_{fes} comprises entre 1 et 10 et des valeurs de z_{esx} de l'ordre de 30 cm (figure 2). Le paramétrage actuel du sol de Mons avec STICS est de 5 pour c_{fes} et de 60 cm pour z_{esx} . Ces résultats sont à compléter avec d'autres conditions climatiques (plus forte demande évaporative) et d'autres conditions initiales (sol non saturé).

Les valeurs de q_0 sous des climats secs (précipitation nulle et évapotranspiration variant de 1 à 6 mm jr^{-1}) sont comprises entre 1 et 12 mm (figure 3), avec un effet très marqué des conditions hydriques initiales. On observe une diminution des valeurs de q_0 lorsque le sol est tassé. D'après Richard et al. (2007), le paramètre q_0 varie de 1.5 mm en sol tassé à 5.4 mm en sol non tassé. Il nous faut maintenant appliquer STICS en méthode inverse pour un climat P/ETP fluctuant.

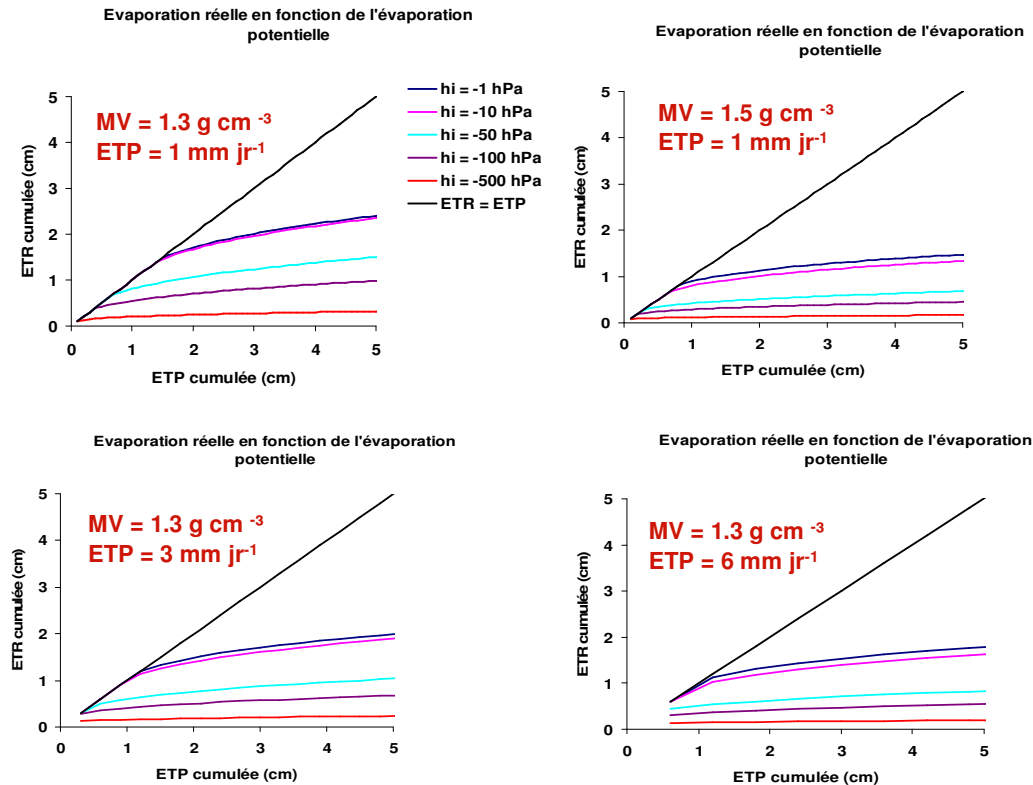


Figure 3 : Estimation du paramètre q_0 . Simulations réalisées avec HYDRUS-1D sur sol de Mons avec une masse volumique de 1.3 ou de 1.5 g cm^{-3} sur 60 cm de profondeur, pour des conditions initiales du potentiel hydrique variant de -1 à -500 hPa. Pas de précipitation, ETP journalière variable de 1 à 6 mm pendant 60 jours.

Conclusion

Ces premiers résultats montrent l'intérêt d'une analyse préalable du régime hydrique d'un sol en vue d'estimer les paramètres c_{es} , z_{esx} et q_0 . Il apparaît que les conditions initiales et la demande évaporative ont une influence sur ces paramètres. Nous en avons défini les ordres de grandeur. Il nous reste à effectuer des simulations avec des scénarios climatiques moins caricaturaux en vue d'appliquer STICS en méthode inverse. Dans tous les cas, cette étude nous apporte des connaissances sur les limites d'application des modèles STICS et HYDRUS-1D.

Références

- Brisson N., Perrier A. (1991) A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models : a review. *Water Resources Research*, 27: 719-727.
- INRA (2005) Base de données géographique des sols de France, descriptif du contenu. <http://gissol.orleans.inra.fr/programme/bdgsf/contenu.php>
- Morvan X. et Le Bas C. (2006) Détermination de profils de types de sol par régions de culture, INRA Unité Infosol Orléans, 29p.
- Richard G. et al. (2007) Eléments de description de la structure du sol introduits dans STICS. Séminaire STICS 2007, Reims, 4 pages.
- Simunek J. (2005) The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media (Version 3.0). 240p.
- Wösten J.H.M. (1997) Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Gregorich E.G., Carter M.R. (eds). *Developments in Soil Science* 25, Elsevier Amsterdam. 221-245.

Remerciements

Les auteurs remercient les programmes français GESSOL2 du Ministère en charge de l'environnement et ADD de l'Agence Nationale de la Recherche pour leur soutien au projet DST (Dégradation des Sols liée au Tassement) au sein duquel le travail a été effectué.

COMPARAISON DU MODULE DRAINAGE DE STICS AVEC LE MODELE DRAINMOD-N

COMPARISON BETWEEN STICS SUBSURFACE DRAINAGE MODULE AND DRAINMOD-N MODEL

Augeard B., Billy C., Birgand F., Tournebize J.

UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref, Parc de Tourvoie, F-92163 Antony
Julien.tournebize@cemagref.fr

Introduction

Le drainage agricole concerne près de 10% des sols agricoles. Son implantation pour raison agronomique a aussi des impacts sur les écoulements. Le drainage par tuyaux enterrés modifie les chemins de l'eau et une approche spécifique est nécessaire pour les prendre en compte. Depuis la version 5, STICS possède un module drainage, adapté au contexte français (sol hydromorphe provoqué par une couche moins perméable à une profondeur de 0,5 à 1 m). Dans ce travail, notre objectif est de comparer les performances de ce module avec un modèle spécifique du drainage DRAINMOD (Skaggs, 1980). Les données hydrologiques (pluies, ETP, débits, NO_3) utilisées proviennent du bassin versant expérimental de l'Orgeval (Seine et Marne).

Formalisme de STICS

Le module drainage de la version 6 est décrit dans Tournebize et al. 2004. En résumé, le drainage a été simplifié sur les aspects spatiaux (adaptation au caractère monodimensionnel de STICS) et temporels (pas de temps journalier). Le débit calculé par STICS est basé sur l'équation de Hooghoudt. La porosité de drainage (variable nécessaire pour calculer les variations de hauteur de nappe) est assimilée dans STICS à la macroporosité.

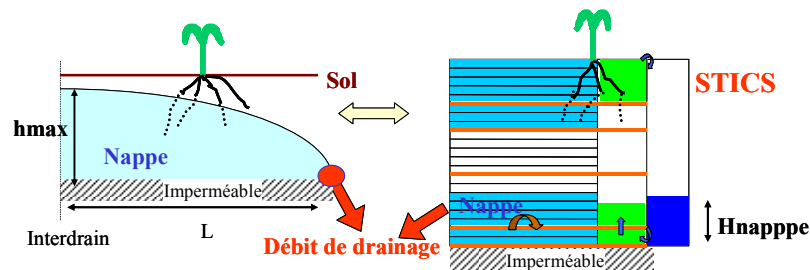


Figure 1 : Formalisme du drainage dans STICS

Notons que le transfert de l'azote par drainage a été conceptualisé à partir des travaux de Arlot (1999) (sur une base de transfert 2D) et simplifié (pour le 1D) en considérant que les transferts sont prépondérants au niveau de la hauteur de nappe moyenne (calculée entre le drain / interdrain).

Formalisme de DRAINMOD-N

La version 5 de DRAINMOD-N (Brevé, 1997) est un modèle développé pour gérer les excès d'eau dans les zones plates artificiellement drainées de la Caroline du Nord (USA). L'intérêt de ce modèle réside dans la simplicité de son interface et son utilisation large dans le domaine de la modélisation des systèmes drainés (Yang et al., 2007).

Les principaux mécanismes simulés sont les suivants :

- les processus hydrologiques : précipitations, drainage, infiltration, évapotranspiration, ruissellement, stockage d'eau à la surface du sol et en zone non saturée
- les transformations de l'azote dans le sol (minéralisation, dénitrification) et l'absorption d'azote par les cultures

Un schéma du principe de fonctionnement hydrologique est présenté sur la figure 2.

Le calcul de l'infiltration s'effectue à partir de l'équation de Green et Ampt (1911) par application directe de la loi de Darcy de part et d'autre de la zone d'infiltration de l'eau appelée "front saturé" du sol. Suite à l'infiltration, les circulations d'eau dans le sol se différencient en fonction de la nappe dont la position définit l'état de saturation du sol.

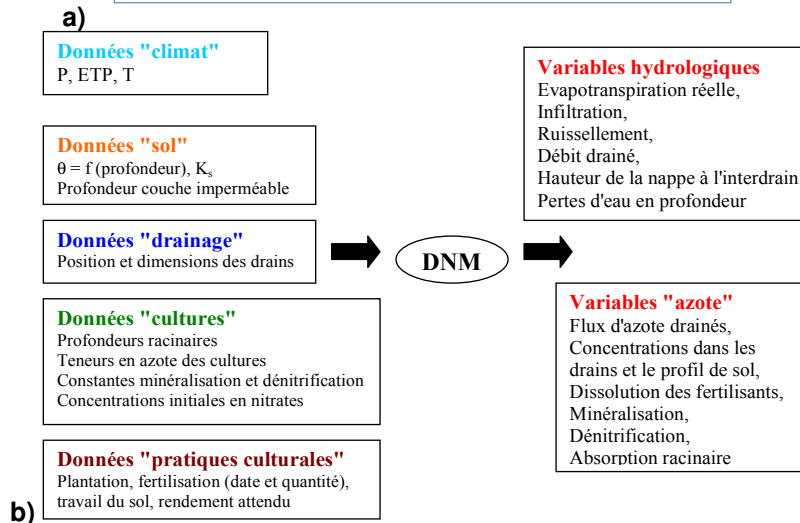
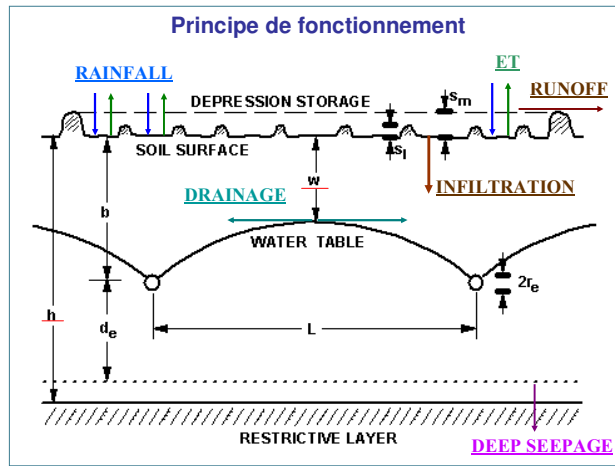


Figure 2 : (Schéma du principe de fonctionnement de Drainmod (a, d'après Skaggs, 1978) et diagramme des entrées / sorties (b))

▪ Circulation en zone non-saturée

Au-dessus de la nappe, la distribution de l'eau est supposée être celle d'un profil de sol à l'équilibre, c'est-à-dire que le potentiel de pression au-dessus de la nappe est essentiellement hydrostatique : les mouvements ascendants d'eau par capillarité à partir de la nappe d'eau d'*Upward flux*, contribue à satisfaire l'évapotranspiration potentielle dans la zone racinaire.

▪ Circulation en zone saturée

Le débit drainé est calculé à partir de l'équation de Hooghoudt. En dessous de la nappe, les échanges s'effectuent en zone saturée et dépendent fortement des valeurs de conductivités hydrauliques à saturation des couches de sol. Les flux verticaux d'eau diminuent linéairement du toit de la nappe à la couche imperméable.

Le couplage des modules hydrologiques et azote permet de modéliser un cycle de l'azote simplifié ($\text{NO}_3\text{-N}$). Les processus considérés par le modèle sont les suivants : dissolution des fertilisants, consommation par les plantes, minéralisation de l'azote organique, dénitrification, pertes par drainage et ruissellement. Les flux d'azote simulés tiennent compte des circulations verticales dans la zone non-saturée, latérales et verticales dans la zone saturée et sont représentés par une équation d'advection-diffusion-réactivité (Brevé et al., 1998).

Description du site de mesure

Le bassin versant expérimental de l'Orgeval (104 km²) est suivi depuis 1962 par le Cemagref. Depuis 1998, des sous bassins emboîtés ont été instrumentés afin d'étudier finement la genèse de la qualité

de l'eau dans les bassins versant ruraux amont (ordre de Strahler¹ < 3). Le sous bassin de Goins est un ensemble d'une superficie de 130ha totalement drainés et agricoles. Il est équipé d'une station de mesure débitométrique et de prélèvement d'échantillon pour la détermination de l'azote minéral, à l'exutoire des collecteurs de drainage. Le sol hydromorphe, de type pseudogley est drainé à une profondeur de 90 cm et un écartement de 10m. Les couverts agricoles typiques de la zone sont : blé d'hiver (49%), féveroles (20%), maïs (19%), orge (10%), escourgeon (2%) (Viriot, 2006).

Résultat

Les deux modèles s'appliquent à l'échelle parcellaire. Or les données acquises portent sur l'échelle bassin versant ou tout au mieux à l'échelle du groupement de parcelle. La comparaison est aisée sur les débits mais devient plus complexe pour l'azote. Les résultats présentés ici ne concernent que les variables hydrométriques. Quelques éléments sur l'azote seront seulement décrits.

a) les débits

La figure 3 montre les chroniques de comparaison d'octobre 2000 à mai 2005. La variabilité climatique de ces années permet de tester les modèles sur des années contrastées (humide hiver 2000/2001, à sec hiver 2004/2005). Pour les deux modèles, les simulations montrent de bons résultats. Les saisons de drainage sont bien reproduites dans l'ensemble. Les limites des deux modèles portent sur les débits de pointe, inhérent aux pas de temps de simulation (journalier) et sur le démarrage de la saison de drainage (l'amorce, généralement en novembre ou décembre). Cette limite peut être atténuée pour le modèle DRAINMOD-N en raison des aspects plus mécanistes de l'approche de modélisation (prise en compte spécifique de la zone non saturée et calcul des flux hydriques, nombre de paramètres du sol supérieur). En revanche pour STICS, la simplification des processus nécessitera une nouvelle conceptualisation de la phase d'amorce.

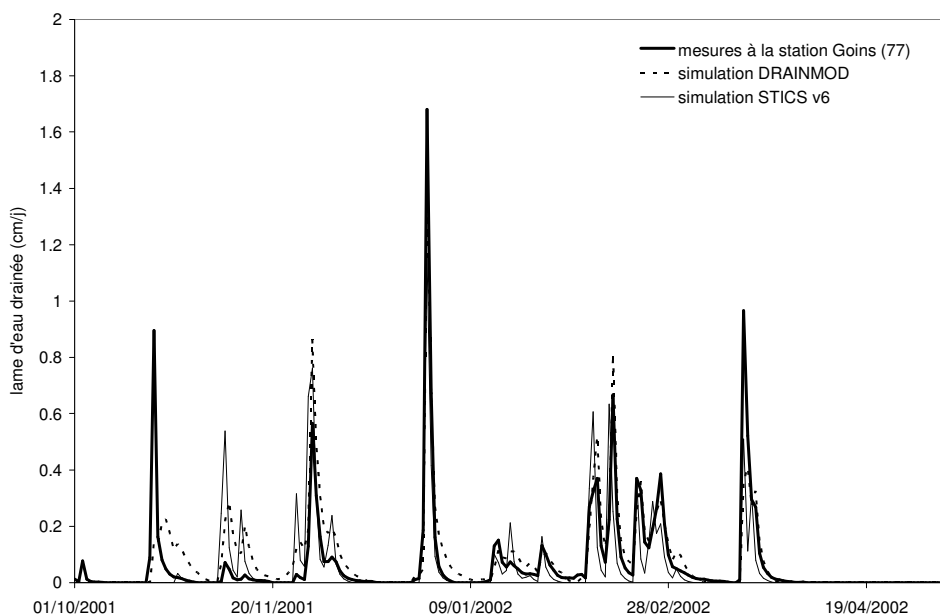


Figure 3 : Comparaison des débits mesurés à la station de Goins (Seine et Marne, 130ha) et simulés (DrainMod version 5, STICS version 6) d'octobre 2001 à mai 2002.

Cependant en terme de bilan hydrologique sur l'ensemble des années de simulation (tableau 1), les modèles STICS et DRAINMOD-N présentent des résultats très acceptables.

b) l'azote

Les données mesurées sont à l'échelle du bassin versant agricole de 130 ha (groupement de 18 parcelles). Pour la simulation des différents processus de transformations de l'azote il est donc

¹ La méthode, devenue classique, de hiérarchisation des branches d'un réseau hydrographique (Horton-Strahler 1952) est fondée sur l'importance croissante de ces branches, depuis les ramifications originelles jusqu'à la fin du collecteur principal.

nécessaire d'intégrer toutes les rotations culturales et tous les paramètres agronomiques de l'ensemble des parcelles. Tout d'abord, les modèles sont testés en passant de la parcelle au groupe de parcelle. Cela ne semble pas poser de problème en ce qui concerne les débits spécifiques, mais les premiers résultats de ces tests en cours montrent, en ce qui concerne l'azote, une très forte dépendance à la localisation par la détermination des reliquats.

c) récolte

DrainMod-N n'est pas un modèle de culture mais en fonction de la satisfaction de l'ETP transformé en ETR, des profils racinaires (en données d'entrée), le modèle génère une valeur de pourcentage de rendement optimal. STICS, quant à lui, permet d'évaluer la biomasse produite en intégrant pour le cas des sols hydromorphes le stress hydrique (par excès). La comparaison des valeurs est en cours et n'est pas présentée dans ce résumé.

Année hydrologique	Pluviométrie	Mesure des lames d'eau drainées	DrainMod	STICS
2000-2001	1007	333	410	345
2001-2002	593	145	145	128
2002-2003	542	53	65	75
2003-2004	621	15	15	10
2004-2005	614	3	0	1

Tableau 1 : bilans hydriques des simulations comparés aux mesures basées sur une année hydrologique (oct à oct), en mm de 2000 à 2005.

Conclusion

Le modèle DRAINMOD-N présente l'avantage de pouvoir simuler une succession d'années en une simulation. Si le nombre de paramètres agronomiques sont réduits comparativement à STICS, la description des sols est plus complète et nécessite par conséquent la détermination de paramètres plus nombreux que STICS. La base de calcul des débits est identique dans les deux modèles par application de l'équation de Hooghoudt. Cependant la prise en compte spécifique de la zone non saturée apporte des améliorations dans la prédiction des débits pour DrainMod-N. La comparaison des deux modèles est en cours concernant le cycle de l'azote et la production végétale.

Mais pour le module drainage, il apparaît que l'utilisation de STICS soit particulièrement intéressante.

Références

- Arlot M.P. (1999) Nitrates dans les eaux. Drainage acteur, drainage témoin ? Les enseignements d'une approche hydrologique et hydraulique : - sur l'influence du drainage agricole sur la contamination diffuse par les nitrates ; - sur les possibilités d'utiliser les parcelles drainées pour l'analyse de la dite contamination. Doctorat de l'Université Paris 6, spécialité hydrologie, hydrogéologie géostatistiques et géochimie des eaux, Université Paris VI, 374 pp.
- Brevé M.A., (1997) Drainmod-N, a Nitrogen Model for Artificially Drained Soils. *American Society of Agricultural Engineers*, 40: 1067-1075.
- Skaggs R.W. (1980) Drainmod Reference Report. Methods for Design and Evaluation of Drainage-Water Management Systems for Soils with High Water Tables. United States Department of Agriculture, North Carolina state University, Raleigh, North Carolina.
- Tournebize J., C. Kao, N. Nikolic and D. Zimmer (2004) "Adaptation of the STICS model to subsurface drained soils." *Agronomie*, 24(6-7): 305-313.
- Viriot, D. (2006) Transferts d'eau et d'azote dans un bassin versant agricole drainé. Mémoire de fin d'étude, ESEM, ed Cemagref. 81 p.
- Yang C. C., S. O. Prasher, S. L. Wang, S. H. Kim, C. S. Tan, C. Drury and R. M. Patel (2007) "Simulation of nitrate-N movement in southern Ontario, Canada with DRAINMOD-N." *Agricultural Water Management*, 87(3): 299-306.

Liste des auteurs

LISTE DES AUTEURS

NOM	THEME 1	THEME 2	THEME 3	THEME 4	THEME 5	THEME 6
AGUT C.			poster 4			
ALLARD D.					poster 1	
AUGEARD B.						poster 5
BACULAT B.					poster 3	
BADEAU V.					poster 1	
BARANGER E.		poster 7		poster 1		
BARBEAU G.		poster 2	poster 4			
BARET F.				oral 1		
BEAUDOIN N.			oral 1		poster 2	
BELGAT S.						poster 1
BENHADJ I.		poster 5				
BENOIT M.			poster 1	poster 3		
BERGEZ J-E.				poster 2	poster 1	
BERNARD P.		poster 6				
BERTRAND N.		poster 3				
BESSON B.				poster 3		
BILLY C.						poster 5
BIRGAND F.						poster 5
BOIZARD H.						oral 1
BOTTOIS N.		poster 2	poster 4			
BRIAND B.				poster 3		
BRISSEON N.	oral 1, poster 1,2,3,4 et 6	oral 1	poster 1, 2, 3, 4 et 7, oral 2	oral 1	poster 1 et 3, oral 2	poster 2, 3 et 4, oral 1

LISTE DES AUTEURS

NOM	THEME 1	THEME 2	THEME 3	THEME 4	THEME 5	THEME 6
BUIS S.					poster 2	
BUSSIERE F.					poster 1	
CARLON GOMEZ J-R.	oral 1, poster 1					
CASPER M.			poster 6			
CHANZY A.					poster 1	poster 4 et oral 1
CHARRON M-H.				poster 2		
CHEHBOUNI A.		poster 5				
CLAVERIE M.			poster 4			
CORRE-HELLOU G.	poster 3	poster 1				
COULON C.		poster 2				
COURAULT D.		poster 3				
CROZAT Y.		poster 1				
DEBAEKE P.	oral 1	oral 1				
DEBOVE E.		poster 4 et 7				
DEFOSSEZ P.						oral 1
DELANNOY D.					oral 2	
DEQUE M.					poster 1	
DESFONDS V.	poster 4	poster 3				
DIAZ R.			poster 1			
DIBET A.	poster 3					
DUCHEMIN B.		poster 5		poster 5		
DUMOT V.			poster 4	poster 3		

LISTE DES AUTEURS

NOM	THEME 1	THEME 2	THEME 3	THEME 4	THEME 5	THEME 6
DURAND J-L.	oral 1, poster 1				poster 1	
DURAND V.				poster 3		
DURANDEAU S.				poster 4		
ECHEVERRIA I.			poster 3			
FOURNIOUX J-C.			poster 4			
GABRIELLE B.				poster 4		
GARCIA DE CORTAZAR A.	oral 2, poster 2		poster 4		poster 3	
GASTAL F.	oral 1, poster 1					
GATE P.					poster 1	
GAUDILLERE J-P.			poster 4			
GERVOIS S.			poster 1			
GODARD C.				poster 4		
GONZALES DUGO V.	oral 1, poster 1					
GONZALEZ-CAMACHO J-M.,			poster 5			
GOUTOULY J-P.			poster 4			
GRAUX A-I.		oral 1				
GUERIF M.				poster 5		
GUILIONI L.					poster 1	
HADRIA R.		poster 5		poster 5		
HAGOLLE O.		poster 3				
HANOCQ J-F.		poster 3				
HAUGGARD-NIELSEN H.	poster 3					

LISTE DES AUTEURS

NOM	THEME 1	THEME 2	THEME 3	THEME 4	THEME 5	THEME 6
HENIN V.					poster 4	
HEUER A.			poster 6			
HUARD F.		oral 1	poster 3 et 4		poster 1	
HUBER L.					poster 1	
JACQUET O.	poster 2		poster 4			
JAYET P-A.		poster 4		poster 1 et 4		
JEGO G.						poster 2
JUIN S.	poster 4					
JUSTES E.	oral 1				poster 4	poster 2
KHABBA S.		poster 5				
KPEMLIE E.		poster 3				
LAHROUNI A.		poster 5		poster 5		
LAUNAY M.	poster 3, 4		oral 1, poster 4	oral 1	poster 2, oral 2	poster 2
LE SUEUR D.			poster 4			
LEBAS C.		oral 1		poster 4		poster 4
LEBONVALLET S.						poster 3 et oral 1
LECHARPENTIER P.				poster 5		
LEFEBVRE M.						poster 4
LELIEVRE F.			poster 7			
LEVAIN A.				poster 3		
LEVRAULT F.					poster 1	
LOISEL R.						poster 1

LISTE DES AUTEURS

NOM	THEME 1	THEME 2	THEME 3	THEME 4	THEME 5	THEME 6
LOUSTEAU D.					poster 1	
MAILHOL J-C.			poster 5			
MAKOWSKI D.					poster 4	
MARLOIE O.		poster 3				
MARTIN M.					poster 1	
MARY B.			oral 1			
MASTRORILLI M.	poster 5					
MERCAT C.				poster 3		
MONAMY C.			poster 4			
MOYNE C.	poster 6					
NICOULLAUD B.	poster 5					
NOE M.		poster 6				
NOVELLO N.		poster 7			poster 5	
OLIOSO A.		poster 5		poster 5		
ORTEGAS-FARIAS S.						
PAYAN J-C.	poster 2		poster 4			
PIERI P.					poster 1	
PONSARDIN G.			oral 1			
RAMEL J-P.			poster 4		poster 3	
REYNAUD A.				oral 2		
RICHARD G.			poster 3	poster 1	poster 1	poster 4 et oral 1
RIPOCHE D.		poster 6		oral 1	poster 2	poster 2, oral 1

LISTE DES AUTEURS

NOM	THEME 1	THEME 2	THEME 3	THEME 4	THEME 5	THEME 6
RIVALLAND V.				poster 5		
RODRIGUEZ CALLE J-P.						poster 3
RODRIGUEZ- LOVELLE B.			poster 4			
ROGER-ESTRADE J.				poster 1	poster 1	oral 1
RUGET F.	poster 5	poster 3	poster 5 et 7, oral 2	poster 5, oral 1		
SALANCON E.			poster 4			
SANCHEZ-PEREZ J-M.						poster 2
SAPPE G.		poster 3				
SATGER S.	poster 3		poster 7		poster 3	
SAUBOUA E.			oral 1			
SAUVAGE S.						poster 2
SOUSSANA J-F.					poster 1	
STERCKEMAN T.	poster 6					
SZUCS F.		poster 3				
TERRAY L.					poster 1	
TOUNEBIZE J.						poster 5
VOLAIRE F.			poster 7			
WALLACH D.					poster 4	
WEISS M.		poster 3		poster 5, oral 1		
ZAKHAROV P.		poster 7			poster 5	

Tables rondes

TABLES RONDES

Nom	Prénom	Table ronde 1	Nom	Prénom	Table ronde 2	Nom	Prénom	Table ronde 3
AFFHOLDER	François	1	AFFHOLDER	François	3	AFFHOLDER	François	
BARANGER	Edouard	1	BEAUDOUIN	Nicolas	3	BELGAT	Saci	
BEAUDOUIN	Nicolas	1	BERNARD	Pierre-Yves	3	BERGEZ	Jacques-Eric	
BERNARD	Jennifer	1	BRISSON	Nadine	3	BESSOU	Cécile	
BESSON	Benoît	1	BURTIN	Marie-Line	3	CORRE-HELLOU	Guénaëlle	
BRISSON	Nadine	1	CANNAVO	Patrice	3	COULON	Cécile	
BRUN	François	1	CONSTANTIN	Julie	3	DE NOBLET	Nathalie	
CANNAVO	Patrice	1	CORRE-HELLOU	Guénaëlle	3	DEBOVE	Elodie	
CORRE-HELLOU	Guénaëlle	1	COULON	Cécile	3	DELANNOY	David	
COULON	Cécile	1	DEBAEKE	Philippe	3	DURAND	Vanessa	
COUTURIER	Alain	1	DURAND	Jean-Louis	3	DURANDEAU	Sophie	
DEBAEKE	Philippe	1	GARCIA DE CORTAZAR A.	Inaki	3	GARCIA	Frédéric	
DEBOVE	Elodie	1	GOUTOULY	Jean-Pascal	3	GERMAIN	Claire	
GARCIA	Frédéric	1	HUARD	Frédéric	3	GODARD	Caroline	
GARCIA DE CORTAZAR A.	Inaki	1	JUSTES	Eric	3	GONZALEZ	Juan Manuel	
GODARD	Caroline	1	LAUNAY	Marie	3	HADRIA	Rachid	
GOUTOULY	Jean-Pascal	1	LEBONVALLET	Sophie	3	HUARD	Frédéric	
JUSTES	Eric	1	MARY	Bruno	3	JAYET	Pierre-Alain	
KOLLER	Rémi	1	MOREAU	Jean-Christophe	3	JUSTES	Eric	
LAMY	François	1	NESME	Thomas	3	LACROIX	Bernard	
LAUNAY	Marie	1	NOUIRI	Issam	3	LAUNAY	Marie	
LEBONVALLET	Sophie	1	RAMEL	Jean-Pierre	3	LE BAS	Christine	
METRAL	Raphaël	1	ROGER-ESTRADE	Jean	3	MARY	Bruno	
MOREAU	Jean-Christophe	1	RUGET	Françoise	3	MERCAT	Catherine	
NESME	Thomas	1	SHILI	Inès	3	MOREAU	Jean-Christophe	
POUPA	Jean-Claude	1	THIEBEAU	Pascal	3	NESME	Thomas	
RAMEL	Jean-Pierre	1	VAN DIJK	Paul	3	NOUIRI	Issam	
RAYNAL	Hélène	1	WALLACH	Daniel	3	POUPA	Jean-Claude	
SATGER	Sylvain	1	BARANGER	Edouard	4	RAFFAILLAC	Jean-Pierre	
SAUBOUA	Emmanuelle	1	BARBEAU	Gérard	4	RAMEL	Jean-Pierre	

TABLES RONDES

Nom	Prénom	Table ronde 1	Nom	Prénom	Table ronde 2	Nom	Prénom	Table ronde 3
SHILI	Inès	1	BELGAT	Saci	4	RAYNAL	Hélène	
STERCKEMAN	Thibault	1	BERGEZ	Jacques-Eric	4	RICHTER	Viola	
THIEBEAU	Pascal	1	BERNARD	Jennifer	4	RIPOCHE	Dominique	
VIENNOT	Pascal	1	BESSON	Benoît	4	THIEBEAU	Pascal	
ZAKHAROV	Pavel	1	BESSOU	Cécile	4	VAN DIJK	Paul	
BARBEAU	Gérard	2	BRUN	François	4	VIENNOT	Pascal	
BELGAT	Saci	2	BUIS	Samuel	4	WEISS	Marie	
BERGEZ	Jacques-Eric	2	CHANZY	André	4	ZAKHAROV	Pavel	
BERNARD	Pierre-Yves	2	COUTURIER	Alain	4	BARANGER	Edouard	
BESSOU	Cécile	2	DE NOBLET	Nathalie	4	BARBEAU	Gérard	
BUIS	Samuel	2	DEBOVE	Elodie	4	BEAUDOUIN	Nicolas	
BURTIN	Marie-Line	2	DELANNOY	David	4	BERNARD	Pierre-Yves	
CHANZY	André	2	DURAND	Vanessa	4	BERNARD	Jennifer	
CONSTANTIN	Julie	2	DURANDEAU	Sophie	4	BESSON	Benoit	
DE NOBLET	Nathalie	2	GARCIA	Frédéric	4	BRISSON	Nadine	
DELANNOY	David	2	GERMAIN	Claire	4	BRUN	François	
DURAND	Vanessa	2	GODARD	Caroline	4	BUIS	Samuel	
DURAND	Jean-Louis	2	GONZALEZ	Juan Manuel	4	BURTIN	Marie-Line	
DURANDEAU	Sophie	2	GUERIF	Martine	4	CANNAVO	Patrice	
GERMAIN	Claire	2	HADRIA	Rachid	4	CHANZY	André	
GONZALEZ	Juan Manuel	2	HEUER	Antje	4	CONSTANTIN	Julie	
GUERIF	Martine	2	JAYET	Pierre-Alain	4	COUTURIER	Alain	
HADRIA	Rachid	2	JEGO	Guillaume	4	DEBAEKE	Philippe	
HEUER	Antje	2	KOLLER	Rémi	4	DURAND	Jean-Louis	
HUARD	Fédéric	2	LACROIX	Bernard	4	GARCIA DE COTRAZAR A.	Inaki	
JAYET	Pierre-Alain	2	LAMY	François	4	GOUTOULY	Jean-Pascal	
JEGO	Guillaume	2	LE BAS	Christine	4	GUERIF	Martine	
LACROIX	Bernard	2	LEFEBVRE	Marie-Pierre	4	HEUER	Antje	
LE BAS	Christine	2	MARTIN	Manuel	4	JEGO	Guillaume	
LEFEBVRE	Marie-Pierre	2	MERCAT	Catherine	4	KOLLER	Rémi	
MARTIN	Manuel	2	METRAL	Raphaël	4	LAMY	François	

TABLES RONDES

Nom	Prénom	Table ronde 1	Nom	Prénom	Table ronde 2	Nom	Prénom	Table ronde 3
MARY	Bruno	2	MEZZANA	Sylvain	4	LEBONVALLET	Sophie	
MERCAT	Catherine	2	POUPA	Jean-Claude	4	LEFEBVRE	Marie-Pierre	
MEZZANA	Sylvain	2	RAFFAILLAC	Jean-Pierre	4	MARTIN	Manuel	
NOUIRI	Issam	2	RAYNAL	Hélène	4	METRAL	Raphaël	
RAFFAILLAC	Jean-Pierre	2	REYNAUD	Arnaud	4	MEZZANA	Sylvain	
REYNAUD	Arnaud	2	REZZOUG	Waffa	4	REYNAUD	Arnaud	
REZZOUG	Waffa	2	RICHTER	Viola	4	REZZOUG	Waffa	
RICHTER	Viola	2	RIPOCHE	Dominique	4	ROGER-ESTRADE	Jean	
RIPOCHE	Dominique	2	SATGER	Sylvain	4	RUGET	Françoise	
ROGER-ESTRADE	Jean	2	SAUBOUA	Emmanuelle	4	SATGER	Sylvain	
RUGET	Françoise	2	STERCKEMAN	Thibault	4	SAUBOUA	Emmanuelle	
VAN DIJK	Paul	2	VARELLA	Hubert	4	SHILI	Inès	
VARELLA	Hubert	2	VIENNOT	Pascal	4	STERCKEMAN	Thibault	
WALLACH	Daniel	2	WEISS	Marie	4	VARELLA	Hubert	
WEISS	Marie	2	ZAKHAROV	Pavel	4	WALLACH	Daniel	

Liste des participants

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Prénom	Organisme	Adresse mail	Téléphone
ABDESSEMED	Amirouche	INRA	Martine.Guerif@avignon.inra.fr	04 32 72 22 81
AFFHOLDER	Francois	CIRAD	affholder@cirad.fr	04 99 61 30 52
BARANGER	Edouard	INRA	ebaranger@grignon.inra.fr	01 30 81 53 43
BARBEAU	Gérard	INRA	gerard_barbeau@hotmail.com	02 41 22 56 72
BEAUDOIN	Nicolas	INRA	beaudoin@laon.inra.fr	03 23 23 99 57
BELGAT	Saci	ITA	sacibelgat@yahoo.fr	04 91 91 51 34
BERGEZ	Jacques-Eric	INRA	jberge@toulouse.inra.fr	05 61 28 50 37
BERNARD	Pierre-Yves	INRA	bernard@mirecourt.inra.fr	03 29 38 55 11
BERNARD	Jennifer	INRA	jbernard@toulouse.inra.fr	05 61 28 55 67
BESSON	Benoit	IRSN/LERCM	benoit.besson@irsn.fr	
BESSOU	Cecile	INRA	cbessou@grignon.inra.fr	01 30 81 55 55
BOIZARD	Hubert	INRA	hubert.boizard@mons.inra.fr	03 22 85 75 12
BRISSE	Nadine	INRA	brisse@avignon.inra.fr	04 32 72 23 83
BRUN	Francois	ACTA	francois.brun@toulouse.inra.fr	06 20 50 40 66
BUIS	Samuel	INRA	samuel.buis@avignon.inra.fr	04 32 72 24 26
BURTIN	Marie-Line	ARAA	araa@bas-rhin.chambagri.fr	03 88 19 17 54
CANNAVO	Patrice	INRA	patrice.cannavo@reims.inra.fr	03 26 77 35 85
CHANZY	Andre	INRA	achanzy@avignon.inra.fr	04 32 72 22 11
CONSTANTIN	Julie	INRA	julie.constantin@laon.inra.fr	03 23 23 99 47
CORRE-HELLOU	Guénaëlle	ESA	g.hellou@groupe-esa.com	02 41 23 55 55
COULON	Cécile	INRA	cecile.coulon@angers.inra.fr	02 41 22 55 31
COUTURIER	Alain	INRA	Alain.Couturier@orleans.inra.fr	02 38 41 78 45
DAZIN	Valérie	INRA	valerie.dazin@laon.inra.fr	03 23 23 99 48
DE NOBLET	Nathalie	CEA	nathalie.de-noblet@cea.fr	01 69 08 77 26
DE TOURDONNET	Sophie	INA-PG		01 30 81 52 57
DEBAEKE	Philippe	INRA	debaeke@toulouse.inra.fr	05 61 28 50 16
DEBOVE	Elodie	INRA	elodie.debove@m4x.org	01 30 81 52 39
DELANNOY	David	INRA	david.delannoy@avignon.inra.fr	04 32 72 24 13
DORE	Thierry	INRA	thierry.dore@inapg.inra.fr	01 30 81 54 20
DURAND	Vanessa	IRSN	vanessa.durand-crit@irsn.fr	04 42 19 96 60
DURAND	Jean-Louis	INRA	jldurand@lusignan.inra.fr	05 49 55 60 94
DURANDEAU	Sophie	INRA	sdurand@grignon.inra.fr	01 30 81 53 57

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Prénom	Organisme	Adresse mail	Téléphone
GABRIELLE	Benoît	INRA	Benoit.Gabrielle@grignon.inra.fr	01 30 81 55 51
GARCIA	Frédéric	INRA	fgarcia@toulouse.inra.fr	05 61 28 52 83
GARCIA DE CORTAZAR ATAURI	Inaki	INRA	igarcia@avignon.inra.fr	04 32 72 24 27
GERMAIN	Claire	CIVC	claire.germain@civc.fr	03 26 51 50 76
GODARD	Caroline	Institut Polytechnique LaSalle Beauvais	caroline.godard@lasalle-beauvais.fr	03 44 06 38 29
GONZALEZ	Juan Manuel	CEMAGREF	manuel.gonzalez@cemagref.fr	04 76 70 46 34
GOSSE	Ghislain	INRA	ghislain.gosse@mons.inra.fr	03 22 85 75 04
GOUTOULY	Jean-pascal	INRA	goutouly@bordeaux.inra.fr	05 57 12 25 06
GUERIF	Martine	INRA	mog@avignon.inra.fr	04 32 72 22 81
GUZZI	Agnès	INRA	agnes.guzzi@reims.inra.fr	03 26 77 35 80
HADRIA	Rachid	AUF	r.hadria@gmail.com	05 61 55 85 42
HEUER	Antje	Université Trier, Allemagne	heuer@uni-trier.de	4965 12 01 45 24
HUARD	Frédéric	INRA	huard@avignon.inra.fr	04 32 72 24 08
JAYET	Pierre-Alain	INRA	jayet@grignon.inra.fr	01 30 81 53 49
JEGO	Guillaume	Université Paul Sabatier (Toulouse)	guillaume.jego@cict.fr	05 62 26 99 65
JUSTES	Eric	INRA	Eric.Justes@toulouse.inra.fr	05 61 28 52 50
KOLLER	Rémi	ARAA	araa-direction@bas-rhin.chambagri.fr	03 88 19 17 53
LACROIX	Bernard	ARVALIS - Institut du végétal	b.lacroix@arvalisinstitutduvegetal.fr	05 62 71 79 31
LAMY	François	Agence de l'Eau Seine Normandie	contact@francois-lamy.org ...	01 69 31 93 01
LAUNAY	Marie	INRA	mlaunay@avignon.inra.fr	04 32 72 23 67
LE BAS	Christine	INRA	Christine.Le-Bas@orleans.inra.fr	02 38 41 78 43
LEBONVALLET	Sophie	INRA	sophie.lebonvallet@avignon.inra.fr	04 32 72 23 70
LECUYER	Florence	INRA		03 23 23 99 48
LEFEBVRE	Marie-Pierre	INRA	marie-pierre.lefebvre@orleans.inra.fr	02 38 41 78 00
LEVRAULT	Frédéric	Maison des Agriculteurs Poitou-Charentes	Frederic.Levrault@poitou-charentes.chambagri.fr	05 49 55 61 72
MACHET	Jean-Marie	INRA	jean-marie.machet@laon.inra.fr	03 23 23 99 61
MARTIN	Manuel	INRA	manuel.martin@orleans.inra.fr	21 47 48 36 47
MARY	Bruno	INRA	mary@laon.inra.fr	03 23 23 99 62
METRAL	Raphael	Montpellier SupAgro	metral@supagro.inra.fr	04 67 63 39 08
MEZZANA	Sylvain	IRSN/LERCM	sylvain.mezzana@alternattech.org	03 22 85 75 88
NESME	Thomas	ENITA	t-nesme@enitab.fr	05 57 35 07 57
NICOLARDOT	Bernard	INRA	bernard.nicolardot@reims.inra.fr	03 26 77 35 83

LISTE DES PARTICIPANTS

Nom	Prénom	Organisme	Adresse mail	Téléphone
POUPA	Jean-Claude	INRA	poupa@rennes.inra.fr	02 23 48 54 05
RAFFAILLAC	Jean-Pierre	INRA	jean-pierre.raffaillac@avignon.inra.fr	04 32 72 24 23
RAMEL	Jean-Pierre	CIRAME	ramel-jp@agrometeo.fr	04 90 63 22 66
RAYNAL	Hélène	INRA	raynal@toulouse.inra.fr	05 61 28 52 89
RECOUS	Sylvie	INRA	sylvie.recous@laon.inra.fr	03 23 23 99 63
REYNAUD	Arnaud	INRA	areynaud@toulouse.inra.fr	05 61 12 85 21
REZZOUG	Waffa	INRA	wrezzoug@grignon.inra.fr	01 30 81 55 55
RICHTER	Viola	FAL	viola.richter@fal.de	4953 15 96 23 50
RIPOCHE	Dominique	INRA	domi@avignon.inra.fr	04 32 72 23 84
ROCOURT	Brigitte	INRA	brigitte.rocourt@laon.inra.fr	03 23 23 99 65
ROGER-ESTRADE	Jean	INA-PG	estrade@grignon.inra.fr	06 88 13 18 16
RUGET	Francoise	INRA	ruget@avignon.inra.fr	04 32 72 23 99
SATGER	Sylvain	INRA	satger@supagro.inra.fr	04 99 61 25 07
SAUBOUA	Emmanuelle	INRA	sauboua@grignon.inra.fr	01 30 81 55 24
SHILI	Ines	INRA	ines.shili@grignon.inra.fr	01 30 81 54 21
STERCKEMAN	Thibault	INRA	thibault.sterckeman@ensaia.inpl-nancy.fr	03 83 59 58 66
THIEBEAU	Pascal	INRA	thiebeau@reims.inra.fr	03 26 77 35 89
VALLACH	Daniel	INRA	wallach@toulouse.inra.fr	05 61 28 50 33
VAN DIJK	Paul	ARAA	araa@bas-rhin.chambagri.fr	03 88 19 17 50
VAQUET	Aline	INRA	aline.vaquet@mons.inra.fr	03 22 85 34 07
VARELLA	Hubert	INRA	hvarella@avignon.inra.fr	04 32 72 24 07
VIENNOT	Pascal	ARMINES	Pascal.Viennot@ensmp.fr	01 64 69 47 56
WEISS	Marie	NOVELTIS/INRA	marie.weiss@avignon.inra.fr	04 32 72 23 79
ZAKHAROV	Pavel	INRA	pzakharov@grignon.inra.fr	01 30 81 53 30

Bibliographie

Articles dans revues à comité de lecture

Abiven S., Recous S., Reyes V., Oliver R. (2005) Mineralization of C and N from root, stem and leaf-residues in soil and role of their biochemical quality. *Biology and Fertility of Soils*, 45: 119-128.

Affholder, F., Assad, E.D., Bonnal, P., Macena da Silva, F.A., Forest, F., Madeira Netto, J., Scopel, E., Corbeels, M., 2006. Risques de stress hydrique dans les Cerrados Brésiliens. Du zonage régional à l'analyse des risques à l'échelle des exploitations familiales. *Cahiers Agricultures* 15, 433-439.

Affholder, F., Scopel, E., Madeira Netto, J., Capillon, A., 2003. Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil. *Agronomie* 23, 305-325.

Affholder F., et Scopel E. (2001) Apports de la modélisation des cultures pour le diagnostic agronomique régional: application au cas du maïs chez les petits producteurs des Cerrados brésiliens. In "Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision." (E. Malezieux and G. Trébuil, eds.), pp. 107-125. CIRAD Montpellier.

Barbeau G., Goulet E., Ramillon D., Rioux D., Blin A., Marsault J., Panneau J.P. (2006) Effets de l'interaction porte-greffe-enherbement sur la réponse agronomique de la vigne (*Vitis /vinifera/ L.*, cv Cabernet franc et Chenin). *Le Progrès Agricole et Viticole* (PAV) (4): 80-86.

Baret F., Houlès V., Guéris M. (2007) Quantification of plant stress using remote sensing observations and canopy functioning models: the case of nitrogen management. A paraître dans *Journal of Experimental Botany*.

Beaudoin N., Nicoulaud B., Houlès V. (2007) Etablissement et validation de classes de pédotransfert pour un modèle de culture à l'échelle parcellaire: Application au modèle STICS. in Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures. In: 'Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures: vers une agriculture de précision', Guéris M & King D (eds), *Editions Quae, collection Update Sciences and Technologies*.

Beaudoin N., Parnaudeau V., Mary B., Makowski D. et Meynard J.-M. (2004) Simulation de l'impact de différents scénarios agronomiques sur les pertes de nitrate à l'échelle d'un bassin hydrologique. In Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux. Monestiez P., Lardon S. et Seguin B. Eds, Coll. Science Update, INRA Editions, p 117-141.

Beaujouan V., Durand P., Cellier P., Combo S. et Ruiz L. (sous presse) Modélisation de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de cultures sur les fuites d'azote à l'exutoire des bassins versants. *Actes de l'AIP Ecospace*, Ed. INRA.

Beaujouan V., Durand P., Ruiz L. (2001). Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecol. Model*, 137: 93-105.

Bonnal, P., Affholder, F., Jourdain, D., et Scopel, E., 2001. Un modèle bioéconomique pour l'analyse du risque. In "In : Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. - Montpellier : CIRAD, 2001", pp. 329-349.

Brisson N., Wery J., Boote K.W. (2006) Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In "Working with crop models", Wallach D., Makowsky D., Jones J.J. Eds. Elsevier: 261-284

- Brisson N., Corre-Hellou G., Dibet A., Launay M., Crozat Y. (2006) Evaluation of the STICS crop model within the EU INTERCROP project. *Grain Legumes*, 45: 10-12
- Brisson N., and Casals M.L. (2005) Leaf dynamics and crop water status throughout the growing cycle of durum wheat crops grown in two contrasted water budget conditions. *Agronomy for sustainable development*, 25: 151-158.
- Brisson N., Bussi re F., Ozier-Lafontaine H., Sinoquet H., Tournebize R. (2004) Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie*, 24: 409-421
- Brisson N. (2003) Le cadre conceptuel des modèles de culture. Note de l'Académie d'Agriculture, (http://www.academie-agriculture.fr/files/publications/notes_recherche/note_brisson11S03.pdf).
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussi re F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin F.B., Sinoquet H. (2003) An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18: 309-332
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E. (2002) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Assessment by comparing with experimental reality for wheat and corn *Agronomie*, 22: 69-9
- Brisson N., Itier B., L'Hotel J.C., Lorendeau J.Y. (1998) Parameterisation of the Shuttleworth-Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models, *Ecological Modelling*, 107: 159-169
- Brisson N. (1998) An analytical solution for the estimation of the critical soil water fraction for the water balance under growing crops - *Hydrology and Earth System Science*, 2: 221-2
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Nicoullaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R. (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn - *Agronomie*, 18: 311-346
- Brisson N., Dorel M., Ozier-Lafontaine H. (1997) Effects of soil management and water regime on the banana growth between planting and flowering. Simulation using the STICS model - *Acta Horticulturae*: 229-238
- Bruckler L., Lafolie F., Ruy S., Granier J., Beaudequin D. (2000) Modelling the agricultural and environmental consequences of non-uniform irrigation on a maize crop. 1. Water balance and yield. *Agronomie*, 20: 609-624.
- Celette F., Valdés H., Gary C., García de Cort azar Atauri I., Ortega-Farias S. et Acevedo C. (2006). Evaluation of the STICS model for simulating vineyard water balance under two different water management strategies. Soumis   Acta Horticulturae.
- Chauki H., Brisson N., Prévot L. (2003) Experimental modelling of the dynamics of wheat water content. *Agronomie*, 23: 537-544.
- Colbach N., Chauvel B., Gauvrit C., Munier-Jolain N.M. (2007) Construction and evaluation of AlomySys modelling the effects of cropping systems on the blackgrass life-cycle. From seedling to seed production. *Ecological Modelling*, 201: 283-300.
- Colbach N., Durr C., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J. (2006) AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed

characteristics and movements and soil climate. I. Construction. *European Journal of Agronomy* 24: 95-112.

Corre-Hellou G., Brisson N., Launay M., Fustec J., Crozat Y. (2007) Effect of root depth penetration on soil N sharing and dry matter in pea-barley intercrops given different soil N supplies. *Field Crops Research*, accepted for publication.

Courault D., Garcia F., Chatelain M.H., Leenhard D., Ruget F. (2004) Impact des variations climatiques locales induites par les cultures sur les rendements et la gestion des conduites. ECOSPACE, AIP Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux. Monestiez P., Lardon S., Seguin B. Edts. *Collection Science Update*, INRA Editions, Paris, 321-336.

Courault D., Ruget F. (2001) Impact of local climate variability on crop model estimates in the south-east of France. *Climate research*, 18: 195-204.

Debaeke P. (2004) Scenario analysis for cereal management in water-limited conditions by the means of a crop simulation model (STICS). *Agronomie* 24: 315-326.

De Noblet-Ducoudré N., Gervois S., Ciais P., Viovy N., Brisson N., Seguin B., Perrier A. () Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*, 24: 397-407.

Delphin J.E., Chapot J.Y. (2006) Leaching of atrazine, metolachlor and diuron in the field in relation to their injection depth into a silt loam soil. *Chemosphere*, 64: 1862–1869.

Delphin J.E., Chapot J.Y. (2001) Leaching of atrazine and deethylatrazine under a vegetative filter strip, *Agronomie*, 21: 461-470.

Delphin J-E. (2000) Estimation of nitrogen mineralization in the field from incubation test and from soil analysis. *Agronomie*, 20 (4): 349-362.

Di Bella C., Faivre R., Ruget F., Seguin B. (2005) Using VEGETATION satellite data and the crop model STICS-Prairie to estimate pasture production at the national level in France. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30: 3-9.

Di Bella C., Faivre R., Ruget F., Seguin B., Guérif M., Combal B., Weiss M., Rebella C. (2004) Use of SPOT4-VEGETATION satellite data to improve pasture production simulated by STICS included in the ISOP French system. *Agronomie*, 24: 1-13.

Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S., Viennot P. (2007) Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, sous presse.

Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S., Viennot P. (2007) Long term prospective of the Seine river system: confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of Total Environment*, Elsevier.

Durand V., Mercat-rommens C., Cumi P., BENOIT M., Briand B. (2007) Modelling Regional Impacts of Radioactive Pollution on Permanent Grassland. *Journal of Agronomy*, 6(1): 11-20.

Flénet F., Villon P., Ruget F. (2004) Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). *Agronomie*, 24: 367-381.

Gabrielle B., Mary B., Roche R., Smith P., Gosse G. (2002) Simulation of carbon and nitrogen dynamics in arable soils: a comparison of approaches. *European Journal of Agronomy*, 18: 107-120.

García de Cortázar Atauri I., Brisson N. et Gaudillere J.P. (2006) Predictive quality of models of vegetative bud burst in the grapevine. Soumis à *Australian Journal of Oenology and Viticulture*.

García de Cortázar Atauri I., Brisson N., Jacquet I., et Payan J.C. (2006) Asynchronous dynamics of grape maturation. Soumis à *Annals of Botany*.

García-Linares C., Martínez M., Sánchez-Pérez J.M., Justes E., Antigüedad I. (2003). Aplicación del modelo STICS para la determinación de la lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha azucarera en la zona no saturada del suelo. In "Estudios en la Zona no Saturada del Suelo". Vol. VI, 1-6.

Gateau C., Granger S., Kockmann F., Ruget F., Novak S. (2006) Evaluation du potentiel herbager et de sa variabilité en élevage allaitant. *Régionalisation de la démarche ISOP* en Saône-et-Loire. *Fourrages*, 186: 257-269.

Giacomini S.J., Recous S., Mary B., Aita C. () Simulating the effects of nitrogen availability, straw particle size and localization in the soil on the C and N mineralization. *Plant and Soil*, soumis.

Gervois S., De Noblet-Ducoudré N., Viovy N., Ciais P., Brisson N., Seguin B., Perrier A.() Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation on specific sites. *Earth Interactions*, 8: 1-25.

Gonzalez-Camacho J.M., Mailhol J.C., Ruget F. () Impacts locaux attendus du changement climatique sur la production du maïs dans la Drôme, France, accepté à *Irrigation and Drainage*.

Goulet E., Barbeau G. (2006) Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement hydrique du système sol/vigne. *J. Int. Sci. Vigne Vin.*, 40 (2): 57-69.

Guérif M., Houlès V., Mary B., Moulin S., Machet J.M. (2007) Elaboration d'une méthode de préconisation spatialisée de la fertilisation azotée basée sur un modèle de culture et la télédétection 2- intérêt de la modulation et méthodes de spatialisation. In: 'Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures: vers une agriculture de précision', Guérif M. & King D. (eds), Editions Quae, *Collection Update Sciences and Technologies*.

Guérif M, Houlès V, Mary B, Beaudoin N., Machet JM, Moulin S, Nicoulaud B. (2007) Modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé fondée sur le modèle de culture STICS. intérêt de la démarche et méthodes de spatialisation. In: 'Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures: vers une agriculture de précision', Guérif M & King D (eds), Editions Quae, *Collection Update Sciences and Technologies*: 225-248.

Guérif M., Houlès V., Makowski D., Lauvernet C. (2006) Data assimilation and parameter estimation for precision agriculture using the crop model STICS. In: "Working with Dynamic Crop Models", Wallach D., Makowski D. and Jones J.W. (eds.), Elsevier: 395: 401.

Hadria R., Khabba S., Lahrouni A., Duchemin B., Chehbouni A.G., Ouzine L., Carriou J. (in press), Calibration and Validation of the Shoot Growth Module of STICS Crop Model: Application to Manage Irrigation Water in the Marrakesh/Ai Haouz Plain, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, special issue "Potential Water Challenges and Solutions in the New Millennium in Arid Regions".

Hadria R., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Er-Raki S., Dedieu G., and Chehbouni A. (2006) Monitoring of irrigated wheat in a semi-arid climate using crop modelling and remote sensing data: Impact of satellite revisit time frequency, *International Journal of Remote Sensing*, 27: 1093-1117.

- Houlès V., Mary B., Guérif M. (2007) Elaboration d'une méthode de préconisation spatialisée de la fertilisation azotée basée sur un modèle de culture et la télédétection 1- le modèle et les critères agro-environnementaux. In: 'Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures: vers une agriculture de précision', Guérif M. & King D. (eds), Editions Quae, *Collection Update Sciences and Technologies*.
- Houlès V., Mary B., Guérif M., Makowski D., Justes E. (2003) Evaluation of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie*, 24: 339-349.
- Juin S., Brisson N., Clastre P., Grand P. (2004) Impact of global warming on the growing cycles of three forage systems in the upland areas of south eastern France. *Agronomie*, 24: 327-337.
- Justes E., Mary B. (2004). N mineralization from decomposition of catch crop residues under field conditions: measurement and simulation using the STICS soil-crop model. In "Controlling nitrogen flows and losses", (Hatch D.J., Chadwick D.R., Jarvis S.C. and Roker J.A., Eds.), Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 122-130.
- Ledoux E., Gomez E., Monget J.M., Viavattene C., Viennot P., Ducharne A., Benoit M., Mignolet C., Schott C., Mary B. (2007) *Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain*. Science of the Total Environment, *sous presse*.
- Levrault F., Ruget F. (2002) COGITO. Cogito, un modèle pour l'irrigation du maïs *In Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*, *In Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*, 281-300, CIRAD, Collection Repères, Malézieux, Trébuil, Jaeger ed.
- Lopez T., Cid G., GonzAlez F., DueNas F., Ozier-Lafontaine H. and Sierra J. (2006) Prediction of water and nitrate leaches in ferrasols cultivated under irrigation in the south of Havana. *Ciencias Técnicas Agropecuarias* (Cuba), 15: 1-6.
- López T., Cid G., González F., Ozier-Lafontaine H. y Sierra J. (2001) Simulación de transferencias hídricas en Ferrasoles del sur de La Habana. XV Congrès Latino-américain de Science du Sol. Bulletin No. 4., *Soc. Cub. de Science du Sol. Ciencia del Suelo*: 202-203.
- Lorgeou J., Planton S., Delécolle R., Ruget F., Pollacsek M., Tardieu F. (2000) Un nouveau défi pour le maïs de demain. *Persp. Agr.*, 260: 22-28.
- Macena Da Silva, F.A., Silveira Pinto, H., Scopel, E., Corbeels, M., Affholder, F., 2006. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto et soja utilizadas em plantio direto. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 41, 717-724.
- Minette S., Justes E. Effet des cultures intermédiaires sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes. Etude de cas par simulation avec le modèle STICS. In : « Savoirs et savoir-faire sur les bassins versants. Pollution de l'eau et dynamique de restauration de sa qualité en milieu rural ». (Mérot P. et al. Eds.). Les colloques de l'INRA, INRA Editions, Versailles, (in press).
- Morvan T., Alard V. et Ruiz L. (2000) Intérêt environnemental de la betterave fourragère. *Fourrages*, 163: 315-322.
- Nesme T., Brisson N., Lescourret F., Bellon S., Créte X., Plenet D., Habib R. (2006) Epistics: A dynamic model to generate nitrogen fertilisation and irrigation schedules in apple orchards, with special attention to qualitative evaluation of the model. *Agricultural Systems* 202-225.

Nicolardot B., Recous S., Mary B. (2001) Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant and Soil*, 228: 83-103.

Nicoullaud A., Couturier N., Beudoin B., Mary C., Coutadeur et King D. (2004) Modélisation spatiale à l'échelle parcellaire des effets de la variabilité des sols et des pratiques culturales sur la pollution nitrique agricole. *In* Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux. Monestiez P., Lardon S. et Seguin B. Eds, Coll. Science Update, INRA Editions, p 143-161.

Olioso A., Inoue Y., Ortega-Farias S., Demarty J., Wigneron J.P., Braud I., Jacob F., Lecharpentier P., Otlé C., Calvet J.C., Brisson N. (2004) Future directions for advanced evapotranspiration modeling: assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems*, submitted.

Prévoit L., Chauki H., Troufleau D., Weiss M., Baret F., Brisson N. (2003) Assimilating optical and radar data into the STICS crop model for wheat. *Agronomie*, 23: 297-303.

Raynal-Lacroix C., Bertuzzi P., Cavaille D., Brisson N., Ripoche D. (2003) Le risque environnemental en cultures sous abri. Le modèle STICS, outil de diagnostic ? Infos-CTIFL, mars 2003, 36-43.

Reynaud A. (2006) « Adaptation à court et à long terme de l'agriculture face au risque de sécheresse: Une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques ». mimeo UMR LERNA. Soumis.

Rodriguez J.C., Duchemin B., Hadria R., Watts C., Garatuza J., Chebouni A., Khabba S., Boulet G., Palacios E., Lahrouni A. () Wheat yield estimation using remote sensing and the STICS model in the semiarid Yaqui valley, Mexico, *Agronomie*, 24: 295-304.

Ruget F., Novak S., Granger S. (2006) Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, 186: 241-256.

Ruget F., Brisson N., Delecolle R., Faivre R. (2002) Sensitivity analysis of a crop simulation (STICS) in order to determine accuracy needed for parameters. *Agronomie*, 22: 133-158.

Ruget F., Delécolle R., Le Bas I., Duru M., Bonneville N., Rabaud E., Donet I., Pérarnaud V., Paniagua C. (2002) L'estimation régionale des productions fourragères. *In* Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision, 281-300, CIRAD, Collection Repères, Malzéville, Trébuil, Jaeger ed., 263-282.

Ruy S., Lafolie F., Brisson N., Mary B., Ribolzi O. (2000) Modelling the agricultural and environmental consequences of non-uniform irrigation on maize crop. 2. *Nitrogen balance*, *Agronomie*, 20: 625-642.

Schnebelen N., Nicoullaud B., Bourenane H., Couturier A., Verbeque B., Revalier C., Bruand A., Ledoux E. (2004) The Stics model to predict nitrate leaching following agricultural practices. *Agronomie*, 24: 423-435.

Scopel E., Macena da Silva F.A., Corbeels M., Affholder F., Maraux F. (2004) Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie*, 24: 383-395.

Seguin B. et García de Cortázar Atauri I. (2004) Climate warning: consequences for viticulture and the notion of "terroirs" in Europe. Proceedings of The Seventh International Symposium of Vineyard Physiology and Biotechnology. 21-25 juin Davis (USA), *Acta Horticulturae*, 689: 61-70.

Sierra J., Brisson N., Ripoche D., Noël C. (2003) Application of the STICS crop model to predict nitrogen availability and nitrate transport in a tropical acid soil cropped with maize. *Plant and Soil*, 256: 333-345.

Tayot X., Ruget F., Bouthier A., Lorgeou J., Lacroix B., Pons Y. (1999) STICS en Poitou-Charentes: calibration et validation sur maïs et sorgho. *Perspectives Agricoles*, (243): 87-95.

Tayot X., Ruget F., Bouthier A., Lorgeou J., Lacroix B., Pons Y. (1999) " STICS en Poitou-Charentes: calibration et validation sur maïs et sorgho, *Perspectives Agricoles*, (242), janvier 1999.

Tayot X., Ruget F., Brisson N., Fort J.L, Lemaire G. (1998) Un outil pour le conseil: " Le modèle de simulation de culture STICS ", *Perspectives Agricoles*, (241), décembre 1998.

Tremblay M., Wallach D. (2004) Comparison of parameter estimation methods of crop models, *Agronomie*, 24: 351-365.

Tournebize J., Kao C., Nikolic N., Zimmer D. (2004) Adaptation of Stics model to subsurface drained soils, *Agronomie*, 24: 305-313.

Weiss M., Troufleau D., Baret F., Chauki H., Prevot L., Oliosio A., Bruguier N., Brisson N. (2001) Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. *Agric. Forest Meteorol.*, 108: 113-128.

Rapports, mémoires de fin d'étude ou de thèse

Adamiade V., Défossez P., Mary B., Richard G. (2006) Prévion du comportement physique des sols cultivés en fonction de leur teneur en Carbone organique. Rapport de fin de contrat CARTOPAILLE, Qualification de la ressource en pailles de céréales en termes de propriétés physico-chimiques et technologiques, de disponibilité de la ressource et de la durabilité de l'agriculture régionale. Région Picardie, 91 p.

Affholder F. (2001) Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode d'application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. Thesis INA P-G, Paris, 231 p.

Alexandre M. (2002). *Evaluation par simulation avec le modèle STICS des effets environnemental et agronomique des cultures intermédiaires pièges à nitrate*. Mémoire de DAA, Spécialité IAEGE, ENSA Toulouse, 69 p.

Aubourg L. (2004). *Evaluation de l'influence des cultures intermédiaires sur l'alimentation azotée et la production du maïs cultivé en monoculture*. Mémoire d'ingénieur de l'ESITPA Val de Reuil, 95 p. Co-encadrement avec P. Castillon (ARVALIS-IdV).

Beaudoin N. (2006) Caractérisation expérimentale et modélisation des effets des pratiques culturales sur la pollution nitrique d'un aquifère en zone de grande culture. Ph.D. thesis, INA-PG, 177 p.

Beaudoin N., Makowski D., Mary B., Wallach D., Pardoneau V., Parisseaux B., Machet J.M., Meynard J.M. (1997) Evaluation de l'impact économique et environnemental de la mesure agri-environnementale "réduction d'intrants" au moyen de modèles agronomiques, Rapport interne, 79 p. + annexes.

Becouze C. (2005). *Etude de l'impact des pratiques agricoles sur les fuites de nitrates vers les eaux souterraines : utilisation du modèle de culture STICS*. Mémoire de Master 2 Recherche INP-ENSA Toulouse, 34 p. Co-encadrement avec J. Sánchez-Pérez, CNRS, LEH Toulouse.

Bedoussac L. (en cours : 2006-2009). *Modélisation du fonctionnement de cultures associées de blé dur et de pois d'hiver pour la conception et l'évaluation d'itinéraires techniques adaptés aux systèmes de culture à bas niveaux d'intrants*. Bourse MRT 2006, Ecole doctorale SEVAB Toulouse, (Directeur de thèse : E. Justes ; Co-directeur : D. Wallach, INRA Auzeville).

Befeno I. (1998) Mise en œuvre et validation du modèle intégré NIWASAVE des performances des systèmes d'irrigation par canon enrouleur: analyse de scénarios, 57 p.

Bellia S. (1999) Simulation des impacts des changements climatiques attendus sur la production de la culture de blé en Beauce. DEA "Milieux Physiques Méditerranéens", Université d'Aix Marseille, 101 p.

Berthelin E. (2005). *Evaluation du modèle de culture STICS en sols de groies de la station expérimentale ARVALIS et CETIOM du Magneraud*. Mémoire d'ingénieur ENITA Bordeaux. Co-encadrement avec A. Bouthier (ARVALIS-IdV).

Boutant S. (2003). *Effets des couverts en interculture sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes : étude de cas par simulation avec STICS*. Mémoire d'ingénieur de l'ENITA Clermont-

Ferrand, Option « Agronomie et productions Végétales », 45 p. + annexes (co-encadrement avec S. Minette, Agrotransfert Poitou-Charentes).

Brahic F. (2006) Analyse de la variabilité des productions fourragères estimées par STICS: sensibilité aux paramètres d'indice foliaire et variabilité de productions régionales. Mémoire de stage (IUT). STID, IUT2 Grenoble, 41 p.

Briffaerts K. (1998) Utilisation multilocale de STICS-maïs: estimation des qualités prédictives du modèle pour différents jeux de paramètres, mémoire de fin d'études ENSA Toulouse.

Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C., Debaeke P. (2007) Impacts de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique, Note technique AGROCLIM, n°1, 33 p.

Brisson N., Launay M., Juin S., Desfonds V. (2006) Quelles composantes environnementale et génétique pour l'élaboration de la qualité du blé dur en région PACA ? Approche couplée expérimentation modélisation, 56 p.

Brisson N., Crozat Y. (2005) Intercrop modelling work, INTERCROP PROJECT, 35 p.

Brisson N., Juin S., Desfonds V., García de Cortázar Atauri I., Lebonvallet S., Ripoche D., Sappe G., Bes B., Bruchou C., Guerif M., Durr C. et Launay M. (2005) Quelles composantes environnementale et génétique pour l'élaboration de la qualité du blé dur en région PACA ? Approche couplée expérimentation – modélisation. Bilan d'un programme de recherche 2001-2005, 2 Vol., 90 p.

Brisson N. (2003) Effet du CO₂ sur la conductance stomatique et conséquence pour le calcul de l'ETP Penman. Document interne GICC Seine, 5p.

Brisson N. (1998) STICS-APC ou l'adaptation d'un modèle de culture pure aux cultures associées et à certaines composantes de l'agronomie tropicale. Document interne INRA, 41 p.

Brisson N., Guevara E. (1997) Réponse de 5 cultivars de blé à une sécheresse précoce dans la Pampa argentine. II Utilisation du modèle STICS pour analyser les stratégies de résistance à la sécheresse. Colloque Ecophysiologie INRA-INTA, Buenos Aires, novembre 1997.

Brisson N., Pujolle R (1997) Mise au point d'hypothèses simples pour la modélisation de la culture du lin oléagineux en conditions non limitantes. Document interne INRA-CETIOM, 116 p.

Burger P. (2001) Analyse de la variabilité de la teneur en protéines de la graine de soja: approche par voie d'enquête et étude expérimentale de conduites de culture visant de hautes teneurs en protéines. Thèse INA-PG, Paris, 171 p.

Camberou C. (1999) Simulation de la production de petit foin pour une meilleure gestion des apports d'eau et d'azote. Mémoire de Certificat de Spécialisation BTSA. CFPPA de la grande Terre, 24 p. + annexes.

Carlou Gomez, J.R., Durand J.L. (2005) Couplage de l'Eau et de l'Azote dans les Peuplements Cultivés. <http://www.poitou-charentes.inra.fr/ceapc>. Site web du projet soutenu par ECCO PNBC.

Castro-Pons S.(Rs 2004)* Analyse de sensibilité du modèle STICS prairie. Module initialisation. Mémoire de stage (IUT). IUT2 Grenoble. STID.

Cavaille D., 2002. Mise au point d'un outil d'évaluation du risque de lessivage des nitrates. Mémoire ingénieur ENSIACET 50p. Stage au Ctifl Lanxade.

- Corre-Hellou G.(2005) Acquisition de l'azote dans des associations pois-orge (*Pisum sativum* L., *Hordeum vulgare* L.) en relation avec le fonctionnement du peuplement. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 100 p.
- Coulon C. (2006) Etude sur l'utilisation du modèle de culture dynamique STICS-VIGNE et de l'indice de site de TESIC dans le vignoble du Val de Loire. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Horticulture et d'Aménagement du Paysage (ENSHAP), de l'Institut National d'Horticulture (INH) Angers. Période de stage: 03/04/2006 au 29/09/2006.
- Coutadeur C. (1998) Spatialisation du fonctionnement des cultures et estimation des pertes en azote en conditions de culture intensive à irrigation généralisée (petite Beauce du Loiret) Mémoire de fin d'études de l'ESA d'Angers, 54 p.
- Delboe A., Mercat-Rommens C. (2005) Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur le blé d'hiver. Rapport DEI/SESURE, 15, 73 p.
- Delerue J.B. (2000) Calibration et test d'un modèle de culture pour simuler la variabilité intra-parcellaire d'une parcelle de blé d'hiver. Stage ISAB, INRA Unité d'Agronomie Laon (Resp. N. Beaudoin).
- Delphin J.E., Chapot J.Y. (2001) Estimation du lessivage en bas de pente, sous une bande herbeuse et sous maïs, de l'atrazine et de la DEA transportées par les eaux de ruissellement, Ingénieries-Eau-Agriculture-Territoires; n° spécial: Phytosanitaires. Transfert, diagnostic et solutions correctives: 125-128.
- Deytieux V. (2004). *Impacts d'un couvert herbacé permanent sur le fonctionnement du système sol/plante d'une culture de maïs irriguée*. Mémoire d'ingénieur ENSA Rennes, 42 p.
- Diquelou G. (1998) Couplage d'un modèle de fonctionnement d'un agrosystème avec un modèle hydrologique. Mémoire DESS, IFSIC, Rennes. 31 p. + annexes.
- Domergue M. (2001) Impact du réchauffement climatique sur le parcours phénologique d'espèces / variétés fruitières dans la vallée du Rhône. Diplôme Ingénieur ESITPA, 56 p.
- Donet I., Ruget F., Le Bas C., Rabaud V. (2000) Guide d'utilisation d'ISOP. SCEES ed., 45 p. + annexes, en cours.
- Dorel M. (2001) Effets des pratiques culturales sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier. Thèse de docteur de l'Université catholique de Louvain, 129 p.
- Dorsainvil F. (1998-2002). *Evaluation, par modélisation, de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture*. Thèse INA-PG, soutenue le 7 mai 2002, 124 p + annexes.
- Dos Santos Molica. (2006) Modélisation du fonctionnement des cultures au sein d'un bassin hydrologique en vue du test d'une méthode innovante de pilotage de la fertilisation. Rapport de fin d'étude d'Ingénieur de l'ESALQ (San Paolo -Brésil). 32 p.
- Douai C. (1997) Contribution à l'explication de la variabilité des rendements de maïs dans une petite région agricole du Brésil. Mémoire de DAA ENSAM.
- Ducharne A. et al. (24 auteurs dont Brisson),(2004) Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. 60 p.

- Durand et al. (15 auteurs dont Brisson) Analyse hiérarchisée et mise en équations des processus physiques et biologiques impliqués dans le couplage des fonctionnements hydrique et azoté des peuplements cultivés, , Rapport projet ECCO, 15 p.
- Durand V., Mercat-Rommens C. (2006) Projet sensibilisé: Etude régionalisée de l'impact d'une pollution radioactive accidentelle sur une prairie permanente. Note technique DEI/SESURE, 46 p.
- Durand V., Mercat-Rommens C. (2006) Note technique: Application du modèle Stics aux études radioécologiques. Rapport DEI/SESURE, 26 p.
- Durand V., Briand. B., Mercat-Rommens C.(2006) Projet sensibilisé: Simulation avec le modèle agronomique Stics pour l'étude de la culture de laitue. Rapport DEI/SESURE 2006-48, 37 p.
- Echeverria I. (2006) Impacto de la compactation de suelos y la influencia del cambio climático estudiado sobre Picardie, utilizando el programa de simulation STICS.
- Moitrier N., Ripoche D., Fabre J.C., Charron-Moirez M.H., Moitrier N., Lecharpentier P. (2007) Étude d'une technique informatique d'interfaçage de modèles à vocation agroenvironnementale. Rapport du projet innovant DPT E&A, 38 p.
- Faure M-L. (2004) Paramétrage et adaptation, pour le pois (*Pisum sativum* L.), du module fixation du modèle de culture STICS (Simulateur multi-disciplinaire pour les Cultures Standards).. Agrocampus (ENSAR), Rennes, 41 p.
- Fix C. (1996) Estimation des pertes en eau et en nitrates au champ basée sur un modèle de bilan hydrique. Rapport de stage BTS Courcelles-Chaussy, 41 p.
- Flénet F. (2004) Le lin oléagineux relancé en Picardie, *Oléoscope*, (79): 26-27.
- Francois L. (2001) Essai de quantification des flux d'eau et d'azote parvenant à la nappe à l'échelle de la plaine centre Alsace. - ENGEES Strasbourg, ENGEES. CEREG (Centre d'Etudes et de Recherches Eco- Géographiques), ann., 49, Mémoire d'ingénieur et de DEA), 88 p.
- Fritz J. (1999) Mise en oeuvre du logiciel STICS pour l'estimation du lessivage hivernal sous parcelles cultivées. Contribution à la validation de l'indicateur "azote", Rapport de stage, option Maîtrise de l'eau en agriculture, 37 p.
- Gabriel J.L. (2006) Estudio del lavado de nitratos y de las estrategias para su control en la zona vulnerable de Aldeanueva de Ebro (La Rioja). Trabajo Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid (Espagne)., 150 p.
- García de Cortázar Atauri I., Rossello P., Seguin B. (2003) Caractérisation Climatique Des Terroirs Des Côtes-Du-Rhône Méridionales . Rapport Contrat Institut Rhodanien Orange, 2 Vol., 152 p. et 1 Cd.
- García de Cortázar Atauri I. (2002) Influencias agronómicas y modelización de la calidad del trigo duro en la región mediterránea. Diplôme de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs Agronomes de Pampelune (Espagne).
- Garcia de Cortazar Atauri, I. (2001) Méthodologie de l'analyse de la qualité du blé dur en région méditerranéenne. Diplôme ISARA Lyon, 59 p.
- Garcia de Cortazar Atauri I. (2007) Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis Vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse de docteur de l'Ecole Nationale supérieure Agronomique de Montpellier, 274 p.

- Gay F. (2002) Elaboration d'une méthode d'évaluation des risques de pollution nitrique et de pertes de rendement en parcelles agricoles : application à la gestion des irrigations en culture de laitue sous abri froid. Thèse de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure agronomique de Montpellier, 238 p.
- Gervois S. (2004) Les zones agricoles en Europe: évaluation de leur rôle dans les bilans d'eau et de carbone; sensibilité de ces bilans aux changements environnementaux sur le dernier siècle. Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI, 138 p.
- Ghiloufi M.(1999) Méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures: application au tournesol et à la betterave à sucre. Mémoire de DAA INA-PG, 43 p.
- Godard, C., Thèse de doctorat INA P-G, 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, Dec. 2005, 278 p.
- Gomez E. (2002) Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au Bassin de la Seine. Thèse de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 287 p.
- Gonzalez-Camacho J.M. (2002) Impacts attendus du changement climatique sur la demande en eau et la production agricole dans la basse vallée de la Drôme. Rapport du projet GICC "Gestion des impacts du changement climatique dans le Bassin Versant du Rhône, 59 p.
- Gonzalez Dugo M.V. (2006) Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azoté chez les graminées fourragères. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 164 p. + annexes.
- Gouesbier M. (1998) Maïs et gestion de l'eau en Poitou - Charentes: " Comment coupler l'outil expérimental à l'outil modèle de croissance pour mieux valoriser l'expérimentation ".Mémoire de fin d'étude, ESITPA, 1998.
- Granier J., Augier P., Baudequin D., Molle B. (1997) Maquette du modèle intégré NIWASAVE – Rapport d'étape, 40 p.
- Graux, A-I. (2005) Etude des mécanismes de remobilisation d'assimilats chez la betterave sucrière en réponse aux stress abiotiques: expérimentation et modélisation. Mémoire de DEA, ENSAIA / INRA Avignon, 44 p.
- Grosbuis P. (1998) Analyse de sensibilité d'un modèle de prédiction de rendement. ENSA Rennes (Ingénierie mathématique), mémoire à présenter le 28 septembre 1998, 100 p.
- Gueye Sérigne Abdoulaye. Analyse des besoins et mise au point d'une interface adaptant un modèle de simulation de culture pour des utilisateurs de terrain.IUP Avignon (Ingénierie informatique). Mémoire présenté le 15 septembre 1998, 52 p. + annexes.
- Hadria R.(2006) Adaptation et spatialisation du modèle STICS pour la gestion d'un périmètre céréalier irrigué en milieu semi-aride ; Thèse de doctorat, faculté des sciences semlalia, université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 216 p.
- Hannot Y.(1999) Intégration d'un modèle agronomique et d'un modèle hydrologique. Analyse et mise en œuvre. Mémoire DESS, IFSIC, Rennes, 24 p. + annexes
- Hdadik 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, INRA Unité d'Agronomie Laon (Resp. B Mary).

Hollecker D.(2003) Spatialisation d'un modèle de culture pour décrire la variabilité intraparcellaire des états du sol et de la culture. Mémoire de fin d'études ESAP – ISARA, 57 p. + annexes.

Houlès V. (2004) Mise au point d'un outil de modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture. *Thèse I.N.A.-P.G.*, 294 p.

Inizan, Olivier, 2000. Intégration de différents modèles de simulation de processus physiques et biologiques: conception et réalisation d'une plate-forme de couplage. Mémoire de DESS Compétences Complémentaires en Informatique, IFSIC, Université de Rennes I, INRA Bioclimatologie F-84914 Avignon Cedex 9.

Jacqueson S.(2000) Suivi de la croissance et du développement de la luzerne à l'aide du modèle STICS. Mémoire de BTSA Technologie Végétale, Lycée d'Aix-Valabre; INRA Bioclimatologie Avignon, 60 p.

Jego Guillaume (en cours : 2005-2008). *Modélisation de l'impact des pratiques agricoles sur les fuites de nitrates vers les eaux souterraines à l'échelle de la plaine alluviale de la Garonne*. Bourse MRT 2005, Ecole doctorale SEVAB Toulouse, (Directeur de thèse : J. Sánchez-Pérez, CNRS Toulouse, Laboratoire UPS-CNRS-ENSAT ECOLAB ; Co-directeur : E. Justes).

Jonis M.(1996) Contribution à l'explication de la variabilité des rendements de maïs pluvial, chez les petits producteurs du centre-ouest brésilien. Mémoire de DAA ENSAM.

Jouanneau J., 2005. Evaluation du modèle STICS sur culture de laitue sous abri. Mémoire ingénieur ESITPA Rouen. Stage au Ctifl Lanxade.

Joulia Ch., 2003. Etude d'un modèle pour le diagnostic environnemental sur une culture de laitue sous abri. Rapport de maîtrise IUP Productions végétales Amiens, 46p. Stage au Ctifl de Lanxade.

Jourdain D.J., Scopel E. and Affholder F.(2001) Impact of conservation tillage on maize cropping systems productivity and stability: a case study in western Mexico. Mexico, CIMMYT working paper 0102, p 20.

Juin S. (2001) Impact du réchauffement climatique sur la répartition géographique et les calendriers de production de trois systèmes fourragers.. Diplôme Agronomie Approfondie ENSA Montpellier, p 35.

Keichinger O.(1996) Mise au point d'une méthode d'estimation des pertes en polluants sous une bande herbeuse. Mémoire DEA ENSAIA Nancy, 32 p.

Le Bonniec S. (2000) Mémoire DAA, ENSA Rennes, réalisé à l'Unité d'Agronomie de Laon sous la responsabilité de Carolyne Dürr et Guy Richard. Modélisation de la température et de l'humidité dans les lits de semence pour la prévision de la germination, 31 p. + annexes.

Lacaze X. (2005) Interprétation des interactions génotype x environnement et étude des déterminants génétique de l'adaptation : exemple de la teneur en protéines du grain de blé dur (*Triticum turgidum*). Thèse de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 121 p.

Lauvernet C. (2005) Assimilation variationnelle d'observations de télédétection dans les modèles de fonctionnement de la végétation: utilisation du modèle adjoint et prise en compte des contraintes spatiales. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1.

Lebonvallet S. (2002) Simulation de l'azote chez le blé dur et impacts des changements climatiques. DEA Adaptation des plantes cultivées aux contraintes environnementales, 29 p. +

annexes.

Lecoq R. (2002) Paramétrisation du modèle STICS-vigne reposant sur quelques situations caractéristiques du vignoble des Côtes du Rhône méridionales. Mémoire ENITAB, 52 p.

Lejealle S. (2004) Contribution à l'évaluation du modèle d'indice foliaire de la version 5.0 de STICS-Blé du stade épi à 1cm à la floraison. Mémoire Ingénieur ARVALIS-ENSAT, 50 p.

Leurent T. (1998) Modélisation de la croissance et de l'absorption d'azote des cultures intermédiaires: test et adaptation du modèle STICS . Mémoire de DEA INAPG-ENSAM 25 p. + annexes.

Leurent T. (1998). *Modélisation de la croissance et de l'absorption d'azote des cultures intermédiaires : test et adaptation du modèle STICS*. Mémoire de DEA « Biologie, diversité et adaptation des plantes cultivées – Option Agronomie », INA P-G – ENSAM, 24 p. + annexes.

Levain A., Mercat-Rommens C., Rousset-Debet S. (2006) Projet sensib: Etude de la vigne à une pollution radioactive accidentelle. Rapport DEI/SESURE, 54, 49 p.

Levrault F., Tayot X., Ruget F., Ripoche D. (2000) Cogito 1.0, manuel d'utilisation, Chambre régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, 42 p.

López T. (2002) Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de La Habana: Contribución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los Balances Hídricos. Thèse de Docteur en Sciences Agricoles. Université de La Havane (Cuba).

Lorin M. (2003) *Analyse et modélisation de la réponse de géotypes de tournesol à la conduite de culture*, Mémoire de fin d'études, ESA Purpan, Mai 2003, 72 p.

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
MoNit: Prognosen zur Entwicklung der Nitratbelastung
Bestellnr.: P5-041 PN

Bibliographische Kurzinformation: INTERREG III A-Projekt MoNit "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben".

Perspectives d'évolution de la pollution par les nitrates. INTERREG III A: MoNit "Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur" deutsch / français; 154 Seiten; Karlsruhe 2006

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
MoNit: Nitratherkunft im Bodenwasser und Grundwasser
Bestellnr.: P5-039 NB

Bibliographische Kurzinformation: INTERREG III A-Projekt MoNit "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben".

Origine des nitrates dans l'eau du sol et les eaux souterraines. INTERREG III A: MoNit "Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur" deutsch / français; 132 Seiten; Karlsruhe 2006

Malgowski C. (2000) Etude et simulation de la dynamique de minéralisation de l'azote des cultures intermédiaires pièges à nitrates après leur incorporation. Mémoire d'ingénieur ESITPA Val de Reuil, 43 p. + annexes.

Meric M. (2002) Amélioration de la prévision du risque Phomopsis du tournesol par la modélisation, mémoire d'ingénieur, ESA Purpan, 86 p.

- Mignot A. (2004) Contribution à l'évaluation du modèle d'indice foliaire de la version 5.0 de STICS-Blé de la floraison à la maturité physiologique. Mémoire Ingénieur ARVALIS-ENSAT, 49 p.
- Minette S., Justes E. (2005) Effet des cultures intermédiaires sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes. Etude de cas par simulation avec le modèle STICS. In: Qualité de l'eau en milieu rural: Savoirs et pratiques dans les bassins versants, coordination éditoriale de Philippe Mérot (INRA), 352 p.
- Minette S. (2004) Evaluation du logiciel de simulation STICS en Poitou-Charentes. Rapport interne. Agrotransfert, Lusignan, 38 p.
- Motisi N. (2005) Rôle de la litière souterraine dans le transfert d'azote dans une culture associée légumineuse herbacée -banane. Mémoire de Master 2. INAPG. 22 p. + Annexes.
- Moulin C. (2006) Impact du changement climatique sur la conduite de systèmes agricoles rencontrés en Picardie. Mémoire de Master2, AgroM., 24 p. + annexes.
- Mumen M. (2005) Caractérisation du fonctionnement hydrique des sols à l'aide d'un modèle mécaniste de transferts d'eau et de chaleur mis en oeuvre en fonction des informations disponibles sur le sol. Thèse de docteur de l'Université d'Avignon, 181 p.
- Negri I. (2002) La productividad forrajera de la Region Pampeana: uso de sensores remots y modelos de simulacion. Mémoire de fin d'études d'ingénieur agronome, Université Agronomique de Buenos Aires, 100 p.
- Negri I. (2001) Adaptation du modèle de simulation STICS prairies aux conditions de la région de la Pampa de la République argentine. Mémoire de stage, Université Agronomique de Buenos Aires, 15 p. + annexes.
- Nemeth, I. (2001) Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. Application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique. Thèse de doctorat Univ. Montp. II, Sciences de la terre et de l'eau, 205 p. + annexes.
- Nesme T. (2004). Utilisation de modèles agronomiques pour analyser les pratiques des agriculteurs. Application à l'irrigation et à la fertilisation azotée en vergers de pommiers au sein d'une petite région. Thèse de docteur de l'Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier, 174 p.
- Noël C. (2001) Analyse de la croissance et du bilan azoté d'une culture de maïs sur un sol ferrallitique de Guadeloupe. Mémoire de DESS Paris XII, 63 p. + annexes.
- Novak S., Gateau C., Ruget F. & Kockmann F. (2004) Cahier agroclimatique de Saône-et-Loire, n° 10 spécial «PRAIRIES », Association AgroMétéo, 32 p.
- Novak S. (2004) Simulation par le modèle STICS 5 de la production des prairies inondables du Val de Saône. Chambre d'Agriculture de Saône-et-Loire, 32 p. + annexes.
- Nowakowski M. (2003) Mise au point d'un outil pour l'assimilation de données de télédétection dans un modèle de culture, Mémoire 2^{ème} année CUST Clermont-Ferrand, 32 p. + annexes.
- Pantel J. (2000) "Etude et modélisation des couplages entre l'hydrodynamique et les mécanismes de transfert de pollutions azotées en milieu alluvial fortement hétérogène. Nappe de la Vistrenque (Gard)". Thèse de Docteur de l'Université de Montpellier II, Sciences de la Terre et de l'Eau.
- Parnaudeau V. (1997) Evaluation des possibilités d'utilisation du modèle agronomique STICS en conditions régionales: - test de la sensibilité de la sortie "lessivage" du modèle aux conditions

pédo-climatiques régionales –intégration d'un module "volatilisation ammoniacale consécutive à l'épandage de lisier". Mémoire DAA, ENSA Rennes, 56 p. + annexes.

Parnaudeau V. (2005) Caractéristiques biochimiques de produits organiques résiduaux prédiction et modélisation de leur minéralisation dans les sols. Thèse de docteur de l'Agrocampus de Rennes, 81 p.

Paux J. (1999) impact de l'introduction de l'irrigation dans les systèmes de culture du Santerre sur les risques de lixiviation des nitrates, rapport de stage d'ingénieur de l'ISAB, 74 p. + annexes.

Péan L. (2003) Modélisation de la décomposition dans le sol de la matière organique provenant de différents effluents urbains, agro-industriels et d'élevage. *Maîtrise Institut des Mathématiques Appliquées, Angers (FR)*, Rapport de stage, 36 p. + annexes

Pierre P. (2001) Utilisation et adaptation de STICS pour la prévision du drainage dans les sols gonflants drainés des Marais de l'Ouest. Mémoire de fin d'étude Institut Supérieur Agricole de Beauvais, 52 p. + annexes.

Pindard A. (2000) La relation stress hydrique-rendement du maïs en Bresse: quelle perspective de spatialisation ? Utilisation d'un simulateur de culture (STICS), Mémoire d'ingénieur d'agronomie, ENESAD Dijon, 60 p. + annexes.

Plume C. (2002) Etude des indices de végétation issus d'images satellite en vue de leur utilisation dans des modèles de simulation de croissance du blé d'hiver. Mémoire de fin d'étude de l'ISAB, 52 p.

Ponsardin G. 1999) Test et paramétrisation spatialement distribuée de STICS 4.1: applications aux simulations de cartes de rendement et de la recharge de la nappe. Mémoire de fin d'étude de l'ENSAR, 54 p. + annexes.

Quéré L. (1999) Contribution à l'évaluation des modèles d'indice foliaire, de biomasse aérienne et de composantes du rendement de STICS blé, DAA ENSA Rennes.

Rabier P. (juin 2000) "développement d'une plate-forme de couplage d'un programme de désagrégation d'images satellite avec un simulateur de cultures". Mémoire d'ingénieur CNAM en informatique, 106 p.

Régat M. (1997) Etude et modélisation de l'élaboration du rendement de la tomate à croissance déterminée en milieu tropical. rapport de DEA , 25 p.

Ripoche A. (2006) Cinétique de décomposition de résidus d'igname et persistance de l'inoculum de l'antraconose: influence du mode de gestion et de l'organe. Memoire de Master 2, INAPG, 18 p. + Annexes.

Rodriguez Calle J.P. (2006) Modélisation de la culture de quinoa en vue de choix des variétés adaptées à chaque région de l'altiplano Bolivien. Mémoire de Master 2, 45 p.

Roue J. (2000) Quantification de la minéralisation nette d'azote dans les sols bretons après destruction de la prairie et simulation de son impact environnemental. Stage ISAB-INRA.

Ruget F., Sauboua E., Lacroix A. (2005) Analyse de la variabilité régionale du lessivage de nitrates à l'aide d'un modèle de culture. Note, 4 figures, 11 tableaux, 9 p.

Ruy S. (1998) Etude de scénarios à l'aide du logiciel NIWASAVE: effet de l'écartement du canon et de la dose de fertilisation apportée. Rapport contrat européen , 24 p. + annexes.

Saby N., Walter C., Combo S., Quidu O. (1999) Constitution et Thématization de la base de

données du Référentiel Pédologique du sud de l'Ille-et-Vilaine. Rapport de fin de Contrat IGCS Ministère de l'Agriculture, 52 p.

Samson E.(1998) Analyse de sensibilité du modèle de simulation STICS-prairie. IUT Vannes (Statistique et traitement informatique des données), mémoire présenté le 22 juin 1998, 46 p. + annexes.

Sannoud M.S. (2006) Mise en place d'un système d'assimilation de chroniques de données spatialisées dans un modèle de culture pour l'apprentissage des propriétés des sols. Mémoire de Master 2 Pro 'Ingénierie de la modélisation et de la simulation numérique' UFR IMA, Université J. Fourier, Grenoble. Co-encadrement avec S. Buis.

Sauboua E. (2001) Modélisation stochastique fonctionnelle du transfert d'eau et d'azote sous culture de maïs. Application à l'évaluation de l'impact des pratiques agricoles en plaine de Bièvre. Thèse de doctorat, LTHE, Université de Grenoble, 191 p.

Schnebelen N. (2000) Analyse et modélisation de l'impact de la maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates. Application à l'aquifère des Calcaires de Beauce (site de Villamblain). Thèse de docteur de l'Université d'Orléans, 358 p.

Smith P. (2001) Adaptation de STICS à la canne à sucre. Mémoire DAA ENSA Rennes.

Soulié L. (2006) Le dispositif de la Motte: rotation et fertilité du milieu en agriculture biologique sans élevage. Etude de la dynamique de l'azote en conditions limitantes. Propositions et test d'adaptations de la rotation. Mémoire de DAA INA P-G

Soullier F. (2003) Choix des cultures et fertilisation minérale: quelle incidence sur la pollution nitrique ? Essai d'application du modèle STICS sur grandes cultures en région Rhône-Alpes. Mémoire de stage. MFE ISARA Lyon.

Thieuleux L. (2006) Biodisponibilité de l'azote en cultures bananières sur ferrisols. Application a la gestion de la fertilisation azotée. Thèse de Doctorat. Université Antilles-Guyane, 80 p. + Annexes.

Thiébeau P. (2001) Effet de l'azote et de la date de semis sur la mise en place de l'indice foliaire et l'efficacité de conversion de l'énergie absorbée de la moutarde blanche (*Sinapis alba L.*). Mémoire d'Ingénieur des Techniques de l'Agriculture, APCA-CNAM-INA, Paris (FR), 60 p.

Tiers N. (1998) Participation à la modélisation de la production fourragère à l'échelle nationale. Rapport d'activité. INRA Avignon, Unité de bioclimatologie, 40 p. + annexes.

Tiers N. (1997) Estimer les potentialités d'une culture non alimentaire dans la région Poitou-Charentes. Utilisation d'un modèle de simulation de la croissance des cultures. ISA Lille, 53 p. + annexes.

Tourino Soto I. (2001) Capacité de STICS à prévoir le rendement dans une parcelle de blé d'hiver: étude des effets liés à la variabilité des conditions de sol. Mémoire de DEA INAPG-Université de Paris VI-ENS, 31 p.

Tréhet Ch. (1998) Utilisation du modèle de simulation de cultures STICS pour l'étude des variations de la date de début de drainage des sols de marais. Rapport de stage de pré spécialisation, Génie de l'Environnement ENSAR, septembre 1998.

Tremblay M. (2004) Estimation des paramètres pour les modèles de fonctionnement des cultures : application au Tournesol en présence de maladie. Thèse de docteur de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 189 p.

Vacandare J. (1998) Protocole de simulation sur STICS en vue d'un couplage avec le modèle

économique AROPAj. Mémoire de fin d'études ESA Purpan, 18 p. + annexes.

Zanolin A. (2002) Méthodologie de description de la variabilité spatiale des transferts d'eau et d'azote sous parcelle irriguée. Application à l'étude des potentialités de l'agriculture de précision. Cemagref.

Zanolin A. (2003) Irrigation de précision en Petite-Beauce : mesures au champ et modélisation stochastique spatialisée du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de maïs. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6, 187 p.

Communications dans des colloques

Adamiade V., Défossez P., Mary B., Richard G.(2006) Prediction of soil physical behavior according to organic carbon content in the context of straw exportation for energy production. 17th Conference ISTRO, Soil Management for Sustainability, 28/08-3/09/2006, Kiel, Germany. 6 p.

Affholder, F., Madeira Neto, J., Scopel, E., 2004. Yield gap assessment and diagnosis in Brazil using a crop model., New directions for a diverse planet: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26 Sep – 1 Oct 2004.

Affholder F., Bonnal P., Jourdain D., et Scopel E.(1998) Small-scale farming diversity and bioeconomic environment variability: a modelling approach. Proc. of the 15th international symposium of the association for farming systems research and extension, Pretoria, 29 nov-4 dec 1998: 952-959.

Atzberger C., Houlès V., Guérif M., Machet J.M., Mary B., Moulin S.(2004) Site specific calibration of a crop model by assimilation of observations derived from remote sensing, Congrès EGS,25-30 avril 2004, Nice.

Barbeau G., Goulet E., Ramillon D., Rioux D., Blin A., Marsault J., Panneau J.P.(2005) Effets de l'interaction porte-greffe enherbement sur le comportement agronomique de la vigne (/Vitis vinifera/ L., cv Cabernet franc et Chenin. /Actes des/ /XIVè Journées GESCO/, Geisenheim, Allemagne, 23-27 août 2005, session "relations hydriques, sol, racines",Vol.2:103-108.

Barbeau G., Ramillon D., Blin A., Marsault J., Landure J.(2005) Effets combinés de l'enherbement et du porte-greffe sur le comportement agronomique du Cabernet franc et du Chenin. Rôle du climat de l'année. Actes des XIVè Journées GESCO, Geisenheim, Allemagne, 23-27 août 2005. Session "relations hydriques, sol, racines", 2155-160.

Barbeau G., Ramillon D., Blin A., Marsault J., Landure J.(2005) Effets combinés de l'enherbement et du porte-greffe sur le comportement agronomique du Cabernet franc. Actes des XIVè Journées GESCO, Geisenheim, Allemagne, 23-27 août 2005, Vol. 2, session "relations hydriques, sol, racines", 161-166.

Barbeau G., Ramillon D., Goulet E., Blin A., Marsault J., Landure J.(2005) Effets combinés de l'enherbement et du porte-greffe sur le comportement agronomique du Chenin. Actes des XIVè Journées GESCO, Geisenheim, Allemagne, 23-27 août 2005, Vol. 2, session "relations hydriques, sol, racines", 167-172.

Beaudoin N., Ponsardin G., Launay M., Sauboua E., Bernard P., Mary B.(2006) Evaluation of the crop model STICS for predicting crop production and nitrate leaching in arable fields during 8 years. Proceedings of 9 th ESA Congress, Warsaw, Poland, 4-7 September 2006.

Beaudoin N., Ponsardin G., Couturier A., Maucorps J., Mary B.(2002) Test of crop model STICS to assess nitrate leaching at the catchment scale; VII Congress of the European Society for Agronomy, Cordoba, Spain, 15-18 july, p. 669-670.

Beaudoin N., Delerue J.B., Machet J.M., Mary B.(2001) Analysis of spatial variability of winter wheat yield within a field using a crop model. 11th Nitrogen Workshop, Reims, 10-12 sept. 2001, 413-414.

Beaudoin N., Makowski D., Parnaudeau V., Mary B., 1999. Impact of agricultural scenarios on nitrate pollution at the catchment scale. 10th Nitrogen Workshop, Copenhagen (DK) 99/08/23-26, vol 2, IV-6.

- Bernard P.Y., David S., Beaudoin N., 2005*. Evaluation of two simulation models as an environmental management tool for diffuse nitrate pollution. IN : N management in agrosystems in relation to the Water Framework Directive. 14th N-Workshop ; Maastricht ; 2005/10/24-26 : 4 p.
- Brisson, N., Lemaire G., Célette, F., García de Cortázar Aauri, I., (2006) Représentation du statut azoté de la vigne par application des nouveaux formalismes de STICS. Programme CEAPC. 6 p.
- Brisson N., Gervois S., Diaz R., Benoit M. (2005) Climate change and crop management: look towards the past and the future. NJF report 1 (3). 22.
- Brisson N., Gervois S., Diaz R., Benoit M. (2005) Changements climatiques et pratiques agricoles. Compte-rendu de l'Académie d'Agriculture, séance du 6 avril 2005.
- Brisson N. (2004) Contribution of the STICS model outputs to the agronomic analysis of the 2003 drought in France. VIII ESA congress. July 11-15 Copenhagen, Denmark, 225-226 (texte intégral).
- Brisson N., Domergue M. (2003) Phenological modelling and climate change impacts in orchards: examples of apple, peach and apricot trees in the Rhone Valley (France). Phenological network workshop, April 1-2, Wageningen (texte intégral).
- Brisson N., Seguin B., Prevot L., Durr C., Cellier P., Richard G. (2002) About the crop temperature as simulated by the STICS model, ESA conference (Cordoue).
- Brisson N., Gaudillère J.P., Ramel J.P., Vaudour E. (2002) Utilisation du modèle de culture STICS pour renseigner les zonages viticoles. IV Symposium sur le zonage vitivinicole. 17-20 juin 2002 Avignon.
- Brisson N., Tournebize R., Bussièrre F., Ghiloufi M. (2001) Adaptation of the model STICS to intercropping and agroforestry systems. Proceedings of the second international symposium on modelling cropping system. July 16-18 2001 Florence (Italy), 111-112.
- Brisson, N., Tournebize R., Sinoquet H. (1999) A simple daily model of radiative transfers for row crops. Workshop on crop modelling, Lerida, juin 1999.
- Brisson N., Ruget F., Jeuffroy M.H., Dorel M., Gay J.P. (1999) Evaluation of the genericity of the STICS model. Workshop on crop modelling, Lerida, juin 1999.
- Casper M., Grimm-Strele J., Gudera Th., Korte S., Lambrecht H., Schneider B., van Dijk P., Rinaudo J.D., Finck M. (2005): EU-Project MoNit: Decision support system to assess the impact of actions and changing frameworks on the nitrate load in the Upper Rhine Valley. Models and scenarios, Proceedings of EWRA conference 2005, Menton (CD-ROM).
- Corbeels, M., Macena da Silva, F.A., Affholder, F., Scopel, E., (2004). Modelling a millet cover crop and subsequent maize production in the tropical Cerrados of Brazil., European Agriculture in a Global Context. 8th ESA Congress, 10-15 July 2004, Copenhagen, Denmark, pp. 975-976.
- Corbeels, M., Macena, F., Affholder, F., Scopel, E., (2003). Simulating effects of crop residue mulching on soil water and maize grain yield in the tropical cerrados of Brazil. 2nd World Congress on Conservation Agriculture, Foz do Iguaçu, Brazil.
- P. Clastre, N. Brisson, F. Ruget, M. Launay, M. Guérif, D. Ripoche (2005) Moultipass: un Outil Informatique pour gérer et organiser les données d'un modèle de fonctionnement dans un contexte de simulations multiples. Séminaire Stics Carry le rouet.
- Debaeke P., Brisson N., Méric M., Moinard J. (2003) Simulation du microclimat dans STICS en vue de l'interfaçage avec un modèle épidémiologique: exemple du couple tournesol-phomopsis. *CR 5^{ème} Séminaire des utilisateurs de STICS*, Arles, 23-24/01, pp. 92-95.

- Debaeke, P., Burger, P., Brisson, N. (2001) A simple model to simulate N₂ symbiotic fixation of annual grain legumes: application to soybean.. Proceedings of the second international symposium on modelling cropping system. July 16-18 2001 Florence (Italy), 17-18.
- Delphin J.E., Chapot J.Y., Meyer J.L., Schneider C. (2004) Lessivage au champ de pesticides injectés à deux profondeurs: atrazine, metolachlor et diuron. 34^{ème} Congrès GFP, Dijon 26-28 mai 2004, 5 p. sur CD.
- Delphin J.E.; Chapot J.Y.; Savourat E. (2003) Evaluation of the migration depth of atrazine by preferential flow in a fallow soil. GFP/MGPR Congress, Aix-en-Provence May 21-24th 2003, 4 p.
- Delphin J.E.; Chapot J.Y.; Savourat E. (2003) Lessivage des nitrates sous sol nu: comparaison des estimations STICS avec les teneurs dans la solution du sol à 3 niveaux, Séminaire STICS; Arles 23-24/01/2003, 72-75.
- Delphin, J.E.; Chapot, J.Y. (2001) Estimation du lessivage en bas de pente, sous une bande herbeuse et sous maïs, de l'atrazine et de la DEA transportées par les eaux de ruissellement, 31. Congrès du Groupe français des pesticides;Lyon; 2001/05/15-17, 4 p. Présentation orale (+ texte).
- Donet I., Ruget F., Rabaud, V., Pérarnaud V., Delécolle R., Bonneville N. (1999) ISOP: an integrated system to real-time assessment of forage production variability over France. ECAM 99, Nordköping.
- Dorsainvil F., Thiébeau P. Justes E. (2002). Are catch crops an efficient way to prevent nitrate leaching and favour nitrogen availability for the next main crop in the case of organic product application in summer? *Proceedings of the VII Congress of ESA* (F.J. Villalobos and L. Testi Eds), Cordoba, Spain, 15-18 July 2002, 489-490.
- Dorsainvil, F., Brisson, N., Ripoche, D., Thiébeau, P., Justes, E. (2001) Adaptation and evaluation of the soil-crop model STICS for catch crops: a tool to compare catch crop management effects on nitrate leaching. Proceedings of the 11th nitrogen workshop, 9-12 sept. Reims, France, 439-440.
- Dury B, Novak S, Kockmann F, Ruget F, Granger S. (2005) Production in grasslands patches liable to flooding: an attempt to simulate production, 2005. EGF 2005, Integrating efficient grassland farming and biodiversity, Tartu, Estonie, 29-31 août 2005, Grassland science in Europe, 10, 82-86.
- Durand J.L., Gary C., Brisson N., Bariac T., Doussan C., Picon-Cochard C., González DUGO M.V., Célette F., Richard P., Vauclin M., Braud I (2005) Couplage de l'eau et de l'azote dans les peuplements cultivés. 1er Colloque de restitution ECCO, 5-6 décembre, Toulouse.
- Duchemin B., Hadria R., BenHadj I., Boulet G., Dedieu G., S. Khabba, A. Lahrouni, B. Mougnot, (2005) Contrôle de STICS à partir de données satellite optique sur blé irrigué en milieu semi-aride, Deuxième séminaire STICS, 17-18/03/2005, Carry-le-Rouet, France.
- Duchemin B., Frappart F., Maisongrande P., Mougnot B., Dedieu G., Hadria R., Lahrouni A., Khabba S., (2003) Utilisation d'une série de données SPOT-HRV pour la paramétrisation du modèle STICS. Application à la spatialisation du bilan hydrique en condition semi-aride (Plaine du Tensift, Maroc). Premier séminaire STICS, 23-24/01/2003, Arles, France.
- Elena Gamboa Cabras. Université Polytechnique de Madrid. Bourse Leonardo. Stage sur la « Mise en place d'une méthodologie pour l'utilisation des données simulées du changement climatique dans des modèles Agronomiques. Application à STICS-vigne ».

- Fabre F., Valé M., Justes E. (2005). Evaluation des modules eau et azote de STICS dans les conditions du Sud de la France. *Proceedings du Séminaire STICS (INRA Avignon)*, 17-18 Mars 2005, Carry-le-Rouet, France, 38-41.
- García de Cortázar Aauri I., Brisson N., Seguin B., Gaudillere J.P. et Baculat B. (2005) Simulations of budbreak date for the vine. The BRIN model. Some applications in climate change study. *Proceedings GESCO. Geisenheim 23-27 Aout 2005*.
- García de Cortázar Aauri I., Brisson N., Seguin B., (2005) Calcul de la date de débourrement de la vigne. Le modèle BRIN. *Actes du Séminaire STICS. Janvier 2005. Carry le Rouet*.
- García de Cortázar Aauri I., Brisson N., Seguin B. (2005) Impact des changements climatiques: un modèle sur la vigne. *Actes du Séminaire STICS. Janvier 2005. Carry le Rouet*.
- García de Cortázar Aauri I., Brisson N., Seguin B. (2004) Estimation de l'impact du changement climatique sur les résultats agronomique de la vigne avec le modèle STICS. *Actes Mondiaiviti. Bordeaux 1 – 2 décembre*.
- García de Cortázar Aauri I., Brisson N., Seguin B., Gaudillere J.P. et Baculat B., (2004) Simulations of Bud Break dates. BRIN model. 7th International Symposium of vineyard physiology and biotechnology. 21-25 juin Davis (USA).
- García de Cortázar Aauri I. et Seguin B. (2003) Conséquences sur les terroirs et les vins: premiers éléments de réponse . *Assemblée Générale du Lien de la vigne, ' La viticulture mondiale face à l'évolution du climat', Paris, 4 avril 2003, actes édités sur le site www.vinelinek.org*.
- Gay F., Wery J., Bertuzzi P., Brisson N., Lafolie F. (2002) Combination of Tensionic measurements and crop models to evaluate nitrate leaching in farmers fields: a case study on lettuce fields in Mediterranean coastal plain. VII ESA congress. July 15-18 Cordoba (Spain).
- Gay F., Wery J., Bertuzzi P., Brisson N., Lafolie F. (2002) Combination of Tensionic measurements and crop models to evaluate nitrate leaching in farmers fields: a case study on lettuce fields in Mediterranean coastal plain. VII ESA congress. July 15-18 Cordoba (Spain).
- Gervois S., Denoblet N., Viovy N., Brisson N., Seguin B., Ciais P. (2002) Croplands: how to represent them in a global biosphere model ? "Agriculture soils and greenhouse gas emissions in a cool-temperate climate" conference 31/07-03/08 Islande.
- Godard, C., Bamière, L., Debove, E., De Cara, S., Jayet, P.A., Niang, N.B., interface between agriculture and the environment : integrating yield response functions in an economic model of EU agriculture, in *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 3rd,2005)*, Arfini, F. (éd.), 15 p.
- Godard C., Brisson N., Jayet P.A., Roger-Estrade J. (2004) Coupling a generic economic farm-type model and a generic crop model. VIII ESA congress. July 11-15 Copenhagen, Denmark, 265-266 (texte intégral).
- Gonzalez-Camacho, Juan Manuel, Mailhol, Jean-Claude, Ruget, Françoise (2003) L'évolution attendue du déficit en eau estivale dans la vallée de la Drôme et conséquences sur l'agriculture irriguée. in *Irrigation et Gestion Concertée des Conflits d'usages dans la Région Euroméditerranéenne, 20ième Conférence Européenne de la CIID, Montpellier, 17-19 Septembre 2003*.
- Guérif M, Houlès V, Mary B. (2005) A tool devoted to recommend spatialised nitrogen rates at the field scale, based on a crop model and remote sensing observations assimilation. 3rd International

Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture, Beijing China, Oct.14-16, 2005.(résumé).

Guérif M, Houlès V, Mary B, Machet J.M, Beaudoin N, Nicoullaud B, Moulin S. (2005) Prise en compte de l'hétérogénéité intra parcellaire dans la gestion de la fertilisation azotée, Colloque GEMAS Comifer, Blois, 15-16 Nov 2005 (résumé).

Guérif M., Hollecker D., Beaudoin N., Bruchou C., Clastre P., Houlès V., Machet J.M., Mary B., Moulin S., Nicoullaud B. (2003) Site specific calibration of a crop model by assimilation of remote sensing data: a tool for diagnosis and recommendation in precision agriculture. Proceedings 4ECPA Berlin, 15-18 June 2003, 253-259.

Hadria R., Oliosio A., Duchemin B., Ruget F., Weiss M., Rivalland V., Guérif M., Lahrouni A., Lecharpentier P., (2007) Couplage du modèle STICS et de données de télédétection optique pour la détermination des pratiques culturales en région des Alpilles. Troisième séminaire STICS, 20-22/03/2007, Reims, France.

Hadria R., Duchemin B., Khabba S., Lahrouni A., Benhadj I., Oliosio A., Chehbouni A., (2007) Utilisation de STICS pour la conduite optimale de cultures céréalières en région aride (plaine de Marrakech/Ai Haouz). Troisième séminaire STICS, 20-22/03/2007, Reims, France.

Hadria R., Oliosio A., Duchemin B., e Ruget F., Weiss M., Rivalland V., Guérif M., Lahrouni A., Chehbouni A. (2006) Spatialization of sowing date and nitrogen supplies by combining remote sensed leaf area index and a crop simulation model. The case of durum wheat in the Alpilles test area (South-East of France). The 2nd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'II, 25-29 September 2006, Valencia, Spain.

Hadria R., Lahrouni A., Duchemin B., Khabba S., Ezzahar J., Er-Raki S., Chehbouni A., Oliosio A., Dedieu G. (2006) Contribution de la modélisation à la gestion d'eau d'irrigation en milieux semi-arides, 1^{er} congrès national sur L'Amélioration de la Production Agricole (APA), 16-17 Mars 2006. Settat, Maroc.

Hadria R., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Er-Raki S., Ezzahar J., Mougénot B., Dedieu G., Chehbouni A., Oliosio, A., (2006) Couplage du modèle STICS et de données de télédétection pour estimer les rendements de blé dans la région semi aride du Haouz/Marrakech, Congrès International sur la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement Durable (GIRE3D), 23, 24 et 25 mai 2006, Marrakech, Maroc.

Hadria R., Khabba K., Lahrouni A., Duchemin B. Khabba S. (2006) Simulation de l'effet de la quantité et fréquence d'irrigation sur le rendement du blé dans les conditions de Marrakech, Congrès International sur la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux et Défis du Développement Durable (GIRE3D), 23, 24 et 25 mai 2006 Marrakech, Maroc.

Hadria R., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Er-Raki S., Ezzahar J., Mougénot B., Dedieu G., Chehbouni AG., Maisongrande P., Oliosio A. (2005) Spatialisation du modèle de culture STICS en région semi aride du Haouz à partir d'images satellites optiques haute résolution, 2^{ème} Congrès Méditerranéen sur les Ressources en eau dans le bassin méditerranéen, WATMED 2, 14 – 17 Novembre 2005, Marrakech, Maroc.

Hadria R., Lahrouni A., Duchemin B., Khabba S., Er-Raki S., Ezzahar J., Chehbouni AG. (2005) Marge de rendement du blé en fonction du nombre d'irrigations dans les conditions de Marrakech: étude par simulation, Congrès International MAMERN, 09-11 Mai 2005, Oujda, Maroc.

Hadria R., Khabba S., Lahrouni A., Duchemin B., Er-Raki S., Ezzahar J., Chehbouni AG., Carriou J., Ouzine L. (2005) Application de STICS à la gestion de l'eau d'irrigation dans les conditions de Marrakech, Deuxième séminaire STICS, 17-18/03/2005, Carry-le-Rouet, France.

- Hadria R., Duchemin, B., Lahrouni, A., Khabba, S., Boulet, G., Chehbouni, A., Dedieu, G., Er-Raki, S., Ezzahar J., Lakhal, A. (2004) "Calibration of the STICS crop model using remote sensing data to assess wheat Evapotranspiration and water requirement in a semi-arid region (Marrakech, Morocco)" *EGU - 1st General Assembly – 25-30 April 2004, Nice, France.*
- Hadria R., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Chehbouni G., Er-Raki S., Ezzahar J., Lakhal A., Boulet G., Escadafal R. Dedieu G. (2004) Utilisation du modèle STICS pour l'estimation des besoins en eau d'une culture de blé dans la zone du Haouz de Marrakech. La modernisation de l'agriculture irriguée dans les pays du Maghreb. 19-21 Avril 2004, Rabat, Maroc.
- Hadria R., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Boulet G., Chehbouni A., Dedieu G., Er-Raki S., Ezzahar J., Lakhal A., Mougnot B. (2004) Estimation of wheat Evapotranspiration in Morocco: Presentation and application of the STICS crop model. Integrated Water Resources Research and Development in southeastern Morocco, International Conference, 1st- 2nd April 2004, Ouarzazate, Morocco.
- Hadria R., Rodriguez J-C., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Watts C., Chehbouni G. (2003) Etalonnage du modèle STICS pour une culture de blé en condition semi-aride (Vallée de Yaqui, Nord-Mexique). Premier séminaire STICS, 23-24/01/2003, Arles, France.
- Heuer A. & Casper M.(2007): STICS – parameterizing and behaviour of a SVAT-model. International Conference on diffuse inputs into the groundwater: Monitoring - Modelling – Management. Graz 2007 (Austria).
- Heuer A., Casper M., Beha A.(2006): Parameterizing and long scale simulation with the SVAT-model STICS. EGU Conference 2006, Vienna (Austria).
- Houlès V, Guérif M, Mary B, Machet J.M, Moulin S, Beaudoin N. (2005) A tool devoted to recommend spatialised nitrogen rates at the field scale, based on a crop model and remote sensing observations assimilation. European Conference on Precision Agriculture, 'Implementation of Precision Agriculture', 9-12 June 2005,Uppsala, Sweden, 2 p.
- Houlès V, Guérif M, Mary B, Makowski D, Machet J M, Moulin S, Beaudoin N. (2004) A tool devoted to recommend spatialized nitrogen rates at the field scale, based on a crop model and remote sensing observations, Proceedings VIII ESA Congress: European Agriculture in a Global Context , Copenhagen (DK), 11-15 July 2004, 273-274 (présentation orale).
- Houlès V, Launay M, Guérif M. (2004) Coupling crop models with remote sensing data for site-specific calibration: application at field and within-field scales. Proceedings VIII ESA Congress: European Agriculture in a Global Context , Copenhagen (DK), 11-15 July 2004, 285-286 (présentation par affichage).
- Houlès, V., Guérif, M., Nowakowski, M., Demarty, J., Makowski, D., Mary, B. (2004) Comparison of three methods of data assimilation into a crop model, based on remote sensing observations. Proceedings of 8th ESA Congress "European Agriculture in a Global Context", Copenhagen, Denmark, 11-15 July, 2004, 275-276.
- Houlès V, Guérif M, Nowakowski M, Demarty J, Makowski D. (2004) Comparison of three methods of data assimilation in a crop model, based on virtual remote sensing observations. Congrès EGS,25-30 avril 2004, Nice (présentation par affichage).
- Houlès V, Guérif M, Mary B, Machet J.M, Makowski, D. (2003) A method for optimising nitrogen fertilisation of wheat within a field based on a crop model approach. Proceedings 4ECPA Berlin, 15-18 June 2003, 437-438. (présentation par affichage).

Houlès V., Beaudoin N., Nicoullaud B., Mary B. (2002) Sensitivity of a crop model to pedotransfer functions at the Field scale; VII Congress of the European Society for Agronomy, Cordoba, Spain, 15-18 July, 631-632.

Juin S.; García de Cortázar Aauri, I et Brisson N. (2003) Méthodologie d'identification de la qualité du blé dur. Poster et communication orale au Séminaire du modèle STICS. Arles.

Justes E., Dorsainvil F., Alexandre M., Thiébeau P. (2003). Simulation et analyse de scénarios de modes de conduite de cultures intermédiaires pièges à nitrate avec le modèle STICS. CR 5^{ème} Séminaire des utilisateurs de STICS, Arles, 23-24/01, 114-117.

Justes E., Mary B. (2003). N mineralization due to decomposition of catch crop residues in field conditions: measurement and simulation using STICS soil-crop model. Proceedings of the 12th Nitrogen Workshop, 21-24 September 2003, Exeter, UK, IGER. (communication orale)

Justes E., Dorsainvil F., Alexandre M., Thiébeau P. (2003). Simulation with STICS soil-crop model of catch crop effect on the nitrate leaching during fallow period and N release for the succeeding main crop. *Proceedings of the 12th Nitrogen Workshop*, 21-24 September 2003, Exeter, UK, IGER. (poster)

Justes E. (2003). Paramétrage de STICS v.5 pour une nouvelle culture : essai de contribution à la réflexion méthodologique. L'exemple de la moutarde blanche utilisée comme culture intermédiaire. CR 5^{ème} Séminaire des utilisateurs de STICS, Arles, 23-24/01, 31-37.

Justes E., Dorsainvil F., Thiébeau P., Alexandre M. (2002). The effect of catch crops on the water budget of the fallow period and the succeeding main crop. Proceedings of the VII Congress of ESA (F.J. Villalobos and L. Testi Eds.), Cordoba, Spain, 15-18 July 2002, 503-504.

Justes E., Dorsainvil F., Brisson N., Ripoche D., Thiébeau P., Mary B. (2001). Evaluation and improvement of the soil-crop model STICS for predicting water and nitrogen budgets during fallow period between two main crops or under catch crops. Proceedings of the 2nd International Symposium Modelling Cropping Systems, 16-18 July 2001, Florence, Italy, ESA Division Agroclimatology and Agronomic Modelling-CNR-DISAT Florence, 67-68.

Justes E., Nicolardot B., Mary B. (2001). C and N mineralisation of catch crop residues: measurements and evaluation of STICS model. *Proceedings of the 11th Nitrogen Workshop*, 9-12 September 2001, Reims, France, INRA, 113-114.

Launay, M., Maupas, N., Graux, A-I. (2006) Water stress impact on sugar beet growth and translocations. Repercussions on the STICS model adaptation. Proceedings of IIRB Colloquium on Sugar beet, Bruxelles, Belgique, February 15-16th, 2006.

Launay M., Brisson N., Dibet A., Satger S., Beure G., Ripoche D., Hauggard-Nielsen H., Corre-Hellou G., Kasyanova E., Monti M., Dahlmann C. (2006) Evaluation of the STICS crop model within the Intercrop EU Project to simulate pea-barley intercropping systems. Proceedings of the sixth European Joint Organic Congress, 30&31 May 2006, Odense, Denmark, 278-279.

Launay, M., Flenet, F., Ruget, F. et García de Cortázar Aauri, I. (2005) Généricité et méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. Actes du Séminaire STICS. Janvier 2005. Carry le Rouet.

Launay, M., Brisson, N. (2004) STICS adaptability to a novel crop as an application of modularity in crop modelling: example of sugarbeet. VIII ESA congress. July 11-15 Copenhagen, Denmark, 283-284 (texte intégral).

Launay, M., Houlès, V., Guérif, M. (2004) Coupling crop models with remote sensing data for site-specific calibration: application at field and within-field scales. Proceedings of 8th ESA Congress "European Agriculture in a Global Context", Copenhagen, Denmark, 11-15 July, 2004, 285-286.

Lauvernet C, Le Dimet F.X, Hascoët L, Baret F, Guérif M, Buis S. (2006) Faisabilité d'une méthode variationnelle utilisant l'adjoint pour l'assimilation de données de télédétection dans un modèle de culture: analyse de sensibilité et perspectives d'application, Colloque National sur l'Assimilation de Données Toulouse, 9-10 mai 2006, (résumé).

C. Lauvernet (2005) Différentiation du modèle STICS pour réaliser des analyses de sensibilité. In Dpt Environnement & agronomie, editor, In Séminaire STICS, pp 7174, Carry le Rouet, mars. 2005, (poster).

Lei Fu () Mise en relation des variables de qualité du raisin avec des indicateurs ecophysiologiques, à l'aide du modèle STICS. Co-encadrement avec Gérard Barbeau et Delphine Ramillon (INRA-Angers). Mémoire stage INH-Angers.

Macena F., Corbeels M., Scopel E., Affholder F., Pinto H.S. (2003) Characterising effects of surface residues on evaporation for a simple water balance model. 2nd World Congress on Conservation Agriculture, vol. 2, Foz do Iguaçu, Brazil, 522-524.

Minette S., Justes E. (2005). Effets des cultures intermédiaires sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes. Etude de cas par simulation avec le modèle STICS. Proceedings du Séminaire STICS (INRA Avignon), 17-18 Mars 2005, Carry-le-Rouet, France, 162-163.

Minette S., Boutant S., Justes E. (2004). Effet des cultures intermédiaires sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes. Etude de cas par simulation avec le modèle STICS. Proceedings du colloque interrégional « Savoirs et savoir-faire sur les bassins versants. Pollution de l'eau et dynamique de restauration de sa qualité en milieu rural ». (J.R. Lucas, L. Ligneau, Eds.), Chambres d'Agriculture de Bretagne, 21-23 avril 2004, Vannes, France, 253-254.

Miroslav Trnka, Françoise Ruget Josef Eitzinger, Petr Hlavinka, Zdeněk Žalud (2006) Application of crop model STICS in the Central European conditions evaluation and climate change impact estimates. 6th European Meteorological Society/Conference on Applied Climatology, 4-8 September 2006, Ljubljana, Slovenia, 00238.

Monestiez P., Couralt D., Allard D., Ruget F. (1999) Spatial interpolation of climatic data taking into account environment of weather stations and application to a crop model. Conference spatial statistics for production ecology. 19-21 april 1999, Wageningen.

Morvan T, Alard V et Ruiz L. (2002) Les risques de pollution azotée en rotations herbagères. In A la recherche d'une agriculture durable Etude de systèmes herbagers économes en Bretagne, Alard V, Béranger C et Journet M (Eds.), Coll. Espace rural, Ed. INRA, 163-176.

Morvan T, Alard V et Ruiz L. (1999) Evaluation comparée des risques de pollution azotée en rotation de type herbager. *Actes du colloque Systèmes Terre et Eau*. Saint Briec 29-30 avril 1999, 167-176.

De Munter I. () L'utilisation du potentiel foliaire de base comme outil d'aide au paramétrage du modèle de culture STICS-vigne. Co-encadrement avec Nadine Brisson et Jean Christophe Payan (ITV-Montpellier). Mémoire Fin d'études ISARA-Lyon.

Nesme T., Brisson N., Lescourret F., Bellon S., Habib R. (2004) EPISTICS: a model designed to study farmers N fertilization and irrigation practices in apple orchards. July 11-15 Copenhagen, Denmark, 641-642 (texte intégral).

- Ortega-Farías, S.O., Valdés H., Gary, C., Brisson, N., Duarte M. (2002) Evaluation of the STICS model for predicting yield and water balance of a tomato crop in Talca (VIIth the region of Chile). XXVIth International Horticultural Congress and Exhibition, 11-17 August, Toronto, Canada.
- Payan J.C., García de Cortázar Aauri, I., Brisson, N. (2005) Assimilation des caractéristiques du système sol-racines par simulation du potentiel de base en parcelle viticole. Actes du Séminaire STICS. Janvier 2005. Carry le Rouet.
- Perotto O. () Analyse des conditions d'établissement du feuillage et de la compétition inter-cep dans le modèle de culture STICS-vigne. » Co-encadrement avec Nadine Brisson et Jean Christophe Payan (ITV-Montpellier). Mémoire Fin d'études ENITA-Bordeaux,
- Poupa, J-C., Ripoche, D. (2004) Automatic production of an algorithm representation of the STICS model in view of its implementation at the regional scale. Proceedings of 8th ESA Congress "European Agriculture in a Global Context", Copenhagen, Denmark, 11-15 July, 2004, 321-322.
- Ripoche D., Launay M. , Beaudoin N. (2005) Les utilitaires divers développés autour de Stics. Seminaire Stics Carry le rouet, Mars 2005.
- Ripoche D., Weiss M., Prevot L. (2001) Driving the STICS crop model by exogenous values of leaf area index. Application to remote sensing . Proceedings of the second international symposium on modelling cropping system. July 16-18 2001 Florence (Italy), 169-170.
- Rodriguez,J.C., Duchemin B.,Watts C.J., Hadria R., Garatuza J., Chehbouni A., Boulet G., Armenta M. and Er-Raki S. (2003) Wheat yields estimation using remote sensing and crop modeling in Yaqui Valley in Mexico. 23th *International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, July 21-25, Toulouse.
- Ruget, F., Di Bella, C., Faivre, R., Seguin, B., Guérif, M. (2004) Estimation of the grassland production through the ISOP system: use of vegetation images for improving the grassland STICS model spatial outputs. Proceedings of 8th ESA Congress "European Agriculture in a Global Context", Copenhagen, Denmark, 11-15 July 2004, 333-334.
- Ruget F., Delécolle R., Tchamitchian M. (1999) Sensitivity analysis of a crop model: use of a two different methods. International symposium modelling cropping systems. Lleida, 21-23 June 1999, 244-245.
- Ruget F., Duru M., Gastal F. (1999) Adaptation of an annual crop model (STICS) to a perennial crop: grassland. International symposium modelling cropping systems. Lleida, 21-23 June 1999, 111-112.
- Ruget F., Delécolle R., Tiers N., Rabaud V., Duru M., Gastal F., Donet I. (1998) Estimating alarm situations on grassland production at regional scale. 7th ICCTA, Computer Technology in Agricultural management and risk prevention, Firenze, Italia, 15-18 November 1998, abstract, 130.
- Ruget F., Tayot X., Delécolle R., Tiers N., Clastre P., Sourie J.-C. (1998) Assessing the advisableness of a non-food crop in a region using a crop simulation model (STICS). In: Biomass for Energy and industry. 10th European Conference and Technology Exhibition. Würzburg, Deutschland, 8-11 June 1998, 1027-1030.
- Seguin B, Brisson N., Legave J.M., Garcia de Cortázar Aauri, I. (2005) Adaptation of horticulture and viticulture to climate change in France. Adaptation of Crops and Cropping Systems to Climate Change. Book of Abstracts. Odense, Danemark. Novembre 7-8, 2005. 55 p.

Seguin B., Domergue M., García de Cortázar Atauri I., Brisson N., Ripoche D. (2004) Le réchauffement climatique récent: impact sur les arbres fruitiers et la vigne. Lettre pigb-pmrc France Changement global, no 16, 50-54.

Thiébeau P., Mary B., Justes E. (2005). Paramétrage de STICS pour la moutarde blanche (*Sinapis alba* L.) par expérimentation. Effet du statut azoté sur l'absorption d'énergie lumineuse, la croissance sénescence des feuilles et l'absorption critique et maximale. *Proceedings du Séminaire STICS (INRA Avignon)*, 17-18 Mars 2005, Carry-le-Rouet, France, 46-48.

Tournebize R., Boval M., Brisson N. (1999) STICS a predictive model for dry matter production and leaf area of a tropical grasslands. In Grassland ecophysiology and grazing ecology. Symposium international. Curitiba du 24 au 26 Août 99, Parana, Brésil, 407-410 (Poster).

Žalud Z., Trnka M., Ruget F., Hlavinka P., Eitzinger ^ J. and Schaumberger A. (2006) Evaluation of crop model STICS in the conditions of the Czech Republic and Austria. Bioclimatological Conference, 11-14 september 2006, Strec(no, Slovakia.

Actes des séminaires

Collectif des utilisateurs de Stics, 2007. Séminaire Stics 2005 20 au 22 mars 2007 Reims, p.

Collectif des utilisateurs de Stics, 2005. Séminaire Stics 2005 17&18 mars 2005 Carry le Rouet, 247 p.

Collectif des utilisateurs de Stics, 2003. Séminaire Stics 2003 23&24 janvier 2003 Arles, 203 p.

Collectif des utilisateurs de Stics, 2000. Réunion Stics 2000 21&22 septembre 2000 CIRAD Montpellier, 71 p.

Questionnaire qualité

QUESTIONNAIRE SEMINAIRE STICS

20 au 22 mars à REIMS

44 réponses sur 60 enquêtés, soit 73 %

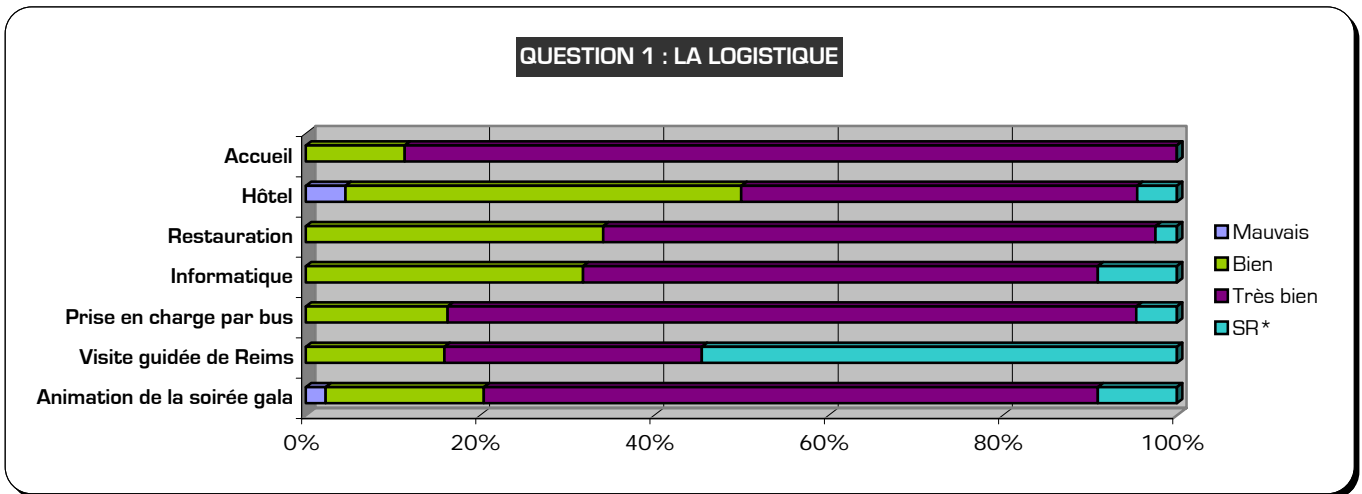
QUESTION 1

La logistique : que pensez-vous de

	Mauvais	Bien	Très bien	SR*	Total
Accueil	0	5	39	0	44
Hôtel	2	20	20	2	44
Restauration	0	14	26	1	41
Informatique	0	14	26	4	44
Prise en charge par bus	0	7	34	2	43
Visite guidée de Reims	0	7	13	24	44
Animation de la soirée gala	1	8	31	4	44

2 moyen + 1 excellent

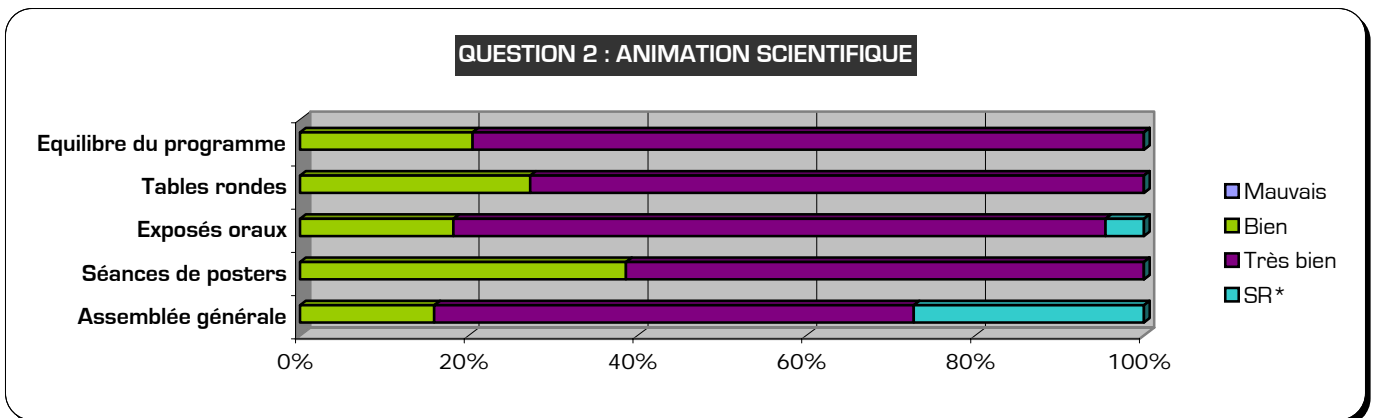
1 moyen



QUESTION 2

Animation scientifique : que pensez-vous de

	Mauvais	Bien	Très bien	SR*	Total
Equilibre du programme	0	9	35	0	44
Tables rondes	0	12	32	0	44
Exposés oraux	0	8	34	2	44
Séances de posters	0	17	27	0	44
Assemblée générale	0	7	25	12	44



* = Sans Réponse

QUESTION 3

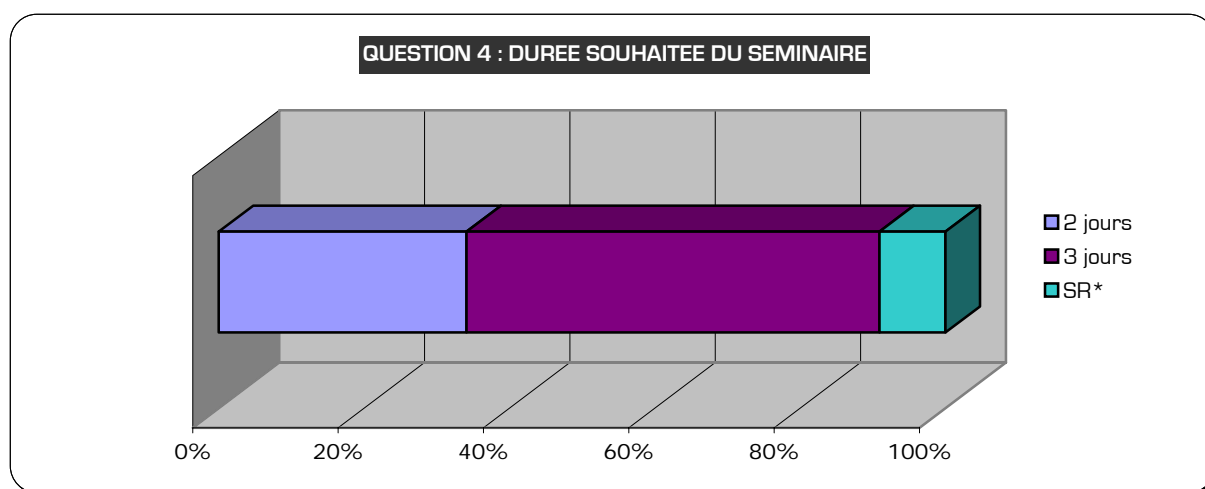
Avez-vous des remarques sur le site web d'inscription ?

Fiche n°	Remarque :
9	Un peu complexe (d'après mes souvenirs, beaucoup de rubriques à renseigner).
13	Très clair, sauf qu'il ne fonctionnait pas sous IE.
18	Pb pour accéder, par quelle petite porte on peut y entrer.
21	Difficile de s'inscrire après la date limite.
23	Plutôt bien fait.
24	Désolé, je ne l'ai pas visité !
26	Le site web d'inscription marche bien, juste 1 pb avec des nom/prénom en cédille (ç).
28	Prévoir des inscriptions pour 1 journée.
29	Nécessité des pré-inscription ? Penser à demander le sexe pour coturnage. Prévoir la possibilité d'inscrire plusieurs posters.
36	Il y avait un bug dans le retour de la facture (.pdf qui n'était pas reconnu).
41	Il faudrait éditer une fiche récapitulative imprimable à la fin.
43	Bon.

QUESTION 4

Préférez-vous un séminaire STICS sur :

2 jours	15
3 jours	25
SR*	4
Total	44



* = Sans Réponse

QUESTION 5

Avez-vous des remarques ou des suggestions ?

Fiche n°	Remarque :
2	La durée des table rondes était très insuffisante pour pouvoir traiter au mieux de sujets complexes.....c'est là mon seul reproche !
3	Séances posters : trop de séances si tous les posters sont placés toutes thématiques confondues.
9	A continuer.
10	C'était super. Merci beaucoup du travail réalisé par toute l'équipe. A bientôt (Inaki).

11	Discussion de fond préparée à l'avance sur la qualité des prédictions de STICS. L'organisation du séminaire était vraiment très bien, et la soirée « gala » était super.
13	Domage de ne pas avoir sollicité le CIVC comme « sponsor » pour une information sur le vignoble (prospectus, bouteilles pour repas, ...).
16	Durée du séminaire est le bon format : 3 jours avec 2 jours de travail. Cela permet de se déplacer avec efficacité.
17	Hôtel un peu excentré. Impossibilité d'aller en ville.
20	Dissocier pause café et poster.
24	Oui : Continuez !!
26	Les exposés oraux des posters sont-ils nécessaires ?
27	3 jours permettent d'avoir 1 planning moins chargé, ce qui permet d'avoir 1 peu plus de temps conviviaux pour échanger avec autres participants.
30	Peut-être ne pas faire le repas de gala sur le lieu du séminaire. Aura-t-on accès aux diaporamas via le site web ?
31	Manque du temps de discussion.
36	Dans un prochain séminaire, introduire une discussion sur les usages « sociaux » du modèle : en aval des résultats produits, comment les acteurs sociaux s'approprient ces résultats, prévisions ou éléments de prospection, quelles répercussions sur les CdC de l'outil, sa diffusion hors de la Communauté des chercheurs institutionnels INRA. Veut-on en faire un « outil de référence » pour produire ces contributions ? Produire de la prévision ou de la prospective, c'est prendre une responsabilité : sur les résultats eux-mêmes (robustesse et viabilité de l'outil), sur leur usage (quelles infos doivent accompagner les résultats ?)
42	Une plus grande part aux non-agronomes.
44	Très bien comme ça !

BILAN DU QUESTIONNAIRE

Les avis concernant les hôtels sont assez partagés entre bien et très bien. La prise en charge par bus a quant à elle été très appréciée.

La visite guidée de Reims étant sur inscription et limitée, cela explique le nombre important de non réponse à la question.

En ce qui concerne les remarques sur le site web d'inscription, nous observons plusieurs informations judicieuses sur les éléments manquants. Néanmoins, vu le temps record consacré à la construction de ce site, les éléments à ajouter ne sont que de l'ordre du détail technique... A prévoir pour les prochains séminaires des délais beaucoup plus importants pour la mise en place du site web.

La formule sur 3 jours est préférée. Il faudrait éventuellement améliorer les séances de poster, peut-être revoir leur intégration dans le programme.

La question concernant l'assemblée générale est restée sans réponse pour cause de départ prématuré de certains enquêtés.

De plus, les tables rondes ont rencontré un vif succès auprès des participants.

Les participants sont en général très satisfait de l'organisation du séminaire, et notamment concernant l'accueil et le programme de ces 3 journées.