HAL open science

Estimation des paramètres sols pour STICS à partir d'une base de données spatialisées sur les sols à petite échelle.

Christine Le Bas, Dominique King, Joël Daroussin, Dominique Arrouays

To cite this version:

Christine Le Bas, Dominique King, Joël Daroussin, Dominique Arrouays. Estimation des paramètres sols pour STICS à partir d'une base de données spatialisées sur les sols à petite échelle.. Séminaire STICS, Mar 2005, Carry-le-Rouet, France. 2005. hal-01601215

HAL Id: hal-01601215

https://hal.science/hal-01601215

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Institut National de la Recherche Agronomique

Département
Environnement & Agronomie

Séminaire Stics

Carry-le-Rouet
17-18 mars 2005

Sommaire

Programme....5
Les tables rondes....7
Les participants aux tables rondes....7
1. L'azote....13
Courbes de dilution de l'azote : formalisation du passage de la plante isolée au peuplement dense.....15
Effet du stress azoté sur la plante : Définition d'un indice de nutrition instantané....23
Etat azoté précoce du blé dur et aide à la décision....28
Utilisation de STICS dans le projet CEAPC sur le couplage des fonctionnements hydrique et azoté des peuplements cultivés....31
Couplage de l'eau et de l'azote dans les peuplements cultivés....35
Evaluation des modules eau et azote du sol de STICS dans les conditions du Sud de la France.....38
Adaptation du module fixation de STICS....42
Paramétrage de Stics pour la moutarde blanche (*Sinapis alba* L.) par expérimentation. Effet du statut azoté sur l'absorption d'énergie lumineuse, la croissance, la senescence des feuilles et l'absorption critique et maximale....46
Le module résidus de STICS pour décrire la Mineralisation du C et N des matières organiques exogènes....50
2. Aide pour une bonne utilisation du modèle et paramétrage....53
Généricité et méthodologie d'adaptation de STICS a de nouvelles cultures....55
Assimilation des caractéristiques du sytème sol-racines par simulation du potentiel de base en parcelle viticole....58
Une boite à outils pour modèles de culture (BAO-MdC)....63
Calcul de la date de debourrement de la vigne. Le modèle BRIN....67
Différentiation du modèle STICS pour réaliser des analyses de sensibilité....71
Estimation des paramètres sols pour STICS à partir d'une base de données spatialisée sur les sols à petite échelle....75
Utilisation du modèle de culture STICS pour comprendre le fonctionnement des systèmes de culture à base de quinoa sur l'altiplano bolivien....79
Les utilitaires divers développés autour de STICS....83
Adaptation du modèle Stics à la vigne au Grand-Duché de Luxembourg : Premiers resultats....85
Contrôle de STICS à partir de données satellite optique sur blé irrigué en milieu semi-aride....87
3. Le long terme....91
Long terme : Implication sur la modélisation des rotations Exemple du projet GICC Seine....93
Impact des changements climatiques : Un modèle sur la vigne....98
Utilisation des scenarios de changement climatique dans un modèle de culture....103
Test de stics 6 pour sa généralisation à l'ensemble des cultures des rotations d'un bassin Hydrologique....107
Simulation de la dynamique du carbone et de l'azote sur le court-terme et le long-terme....117
ORCHIDEE-STICS , un outil pour l'étude des intercations entre ecosystemes cultivés, cycles du carbone et de l'eau et climat....118
4. Couplages avec d'autres modèles....121
Couplage de STICS avec AROPAj : un Modèle d'interfaçage par le biais de courbes de réponses....123
Intégration du formalisme de STICS dans un modèle hydrologique distribué : l'exemple de TNT2. ..128
Modélisation des interactions arbre-culture par couplage de STICS à un modèle arbre spatialisé 3D : principe et architecture informatique....132
Intégration de Stics dans un couplage spatialisé agronomie-hydrologie souterraine sur le bassin de Seine....137
Utilisation d'un modèle de culture pour l'évaluation de politiques environnementales : Restructuration algorithmique de STICS....140

ArTix : base de données et solution logicielle autour du couplage de Stics et du modèle économique AROPAj 143
Coupling STICS to the ISBA SVAT model to assess crop canopy processes from remote sensing data 147
Spatialisation de Stics dans le cadre d'un couplage avec le modèle de la biosphère terrestre Orchidee 151
5. Itinéraires techniques 155
Comment renseigner Les itinéraires techniques à l'échelle des régions européennes ? 157
Simulation du fonctionnement des Cultures associées orge-pois 161
Analyse des interactions besoin en évapotranspiration et rendement en blé : mise au point d'un logiciel d'aide à l'irrigation 165
Effet des cultures intermediaires sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes 170
Une chaîne de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: application à l'évolution depuis 1970 des pratiques agricoles dans le bassin de la Seine 175
Intercropping of cereals and grain legumes for increased production, weed control, inproved product quality and prevention of N-losses in Europeen organic farming systems-INTERCROP. 177
6. STICS, outil d'ingénierie agronomique 179
Utilisation des simulations de STICS comme base pour construire des itinéraires techniques en lin graine de printemps. 181
Possibilités d'utilisation du modèle STICS comme outil de diagnostic du risque environnemental en culture légumière sous-abris 185
Mise au point d'un outil de modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur l'utilisation de stics et la télédétection. 188
Utilisation de stics pour la mise en place d'une veille agro-climatique sur internet 191
Mesure de l'ETP et prévision des pluies : quelles conséquences pour la conduite de l'irrigation du maïs ? 195
Application de STICS à la gestion de l'eau d'irrigation dans les conditions de Marrakech 200
Epistics : Mise au point d'un modèle pour générer des calendriers d'irrigation et de fertilisation en vergers de pommiers 204
Evaluation du modèle STICS en tant qu'outil d'aide à la gestion environnementale des pollutions diffuses par le nitrate d'origine agricole. 207
7. Les projets 211
Moultipass : un Outil Informatique pour gérer et organiser les données d'un modèle de fonctionnement dans un contexte de simulations multiples. 213
Couplage de STICS avec un modèle de structure pour l'assimilation des Images de télédetection. 216
Projet RECORD : REnovation et COoRDination de la modélisation des cultures 219
Projet de simulation du fonctionnement des prairies naturelles herbacées basée sur la caractérisation fonctionnelle de la biodiversité prairiale 222
Presentation du projet de plateforme de modélisation des paysageS du programme SEVE : Place des modeles de Culture 225
PROJET : Assimilation de données satellitaires dans STICS, extrapolation spatiale à la région inter-salar (Bolivie) de production de quinoa 229
L'introduction de la prise en compte des bioagresseurs dans STICS 231
Sensibilité de « Stics 5-Arc info » à l'enchainement des cycles de simulation et à la resolution spatiale de la carte des sols 233
BIBLIO 239
Les participants 259
Plan du site et des salles 263

Programme

Journée du 17/03/2005				
		Orateur	**horaire**	**lieu**
Accueil café			9h00-9h30	accueil +bar
Introduction	N. Brisson		9h30-9h45	Bord de mer
Sessions plénières de la matinée du 17/03 conduites par N. Brisson				
Session plénière thème 1 : L'azote dans STICS			9h45-10h45	Bord de mer
Le statut azoté des peuplements peu denses		G. Lemaire	9h45-10h05	
Proposition d'un indice de stress azoté instantané		B. Mary	10h05-10h25	
Présentation des posters du thème 1		J. L. Durand	10h25-10h45	
Session plénière thème 4 : Couplages avec d'autres modèles			10h45-11h45	Bord de mer
STICS-ORCHIDEE : un exemple de couplage spatial		N. de Noblet	10h45-11h05	
STICS-AROPAj : interfaçage par des courbes de réponse		P.A. Jayet	11h05-11h25	
Présentation des posters du thème 4		M. Guérif	11h25-11h45	
Visite des posters thèmes 1 et 4			11h45-12h30	Bord de mer
Repas			12h30-13h45	
Tables rondes			13h45-14h45	
Thème 1 : azote	animateur	B. Mary	13h45-14h45	Intre
Thème 4 : couplage	animateur	A. Olioso	13h45-14h45	Miejou Labe
Sessions plénières de l'après midi du 17/03 conduites par C. Isbérie				
Session plénière thème 3 : Le long terme			14h45-15h45	Bord de mer
Simulation des rotations dans le projet GICC Seine		E. Sauboua	14h45-15h05	
Impact du changement climatique, exemple de la vigne		I. G. de Cortazar	15h05-15h25	
Présentation des posters du thème 3		N. Beaudoin	15h25-15h45	
Session plénière thème 6 : STICS, outil d'ingénierie agronomique			15h45-16h45	Bord de mer
Expérience d'Agrotransfert-Picardie		F. Flenet	15h45-16h05	
Expérience du CTIFL		P. Mention	16h05-16h25	
Présentation des posters du thème 6		D. Wallach	16h25-16h45	
Pause café			16h45-17h15	Bar
Visite des posters thèmes 3 et 6			17h15-18h00	Bord de mer
Table ronde Interface Homme Machine	animateur	D. Ripoche	17h15-18h00	Miejou Labe
Tables rondes			18h00-19h00	
Thème 3 : long terme	animateur	N. Brisson	18h00-19h00	Miejou Labe
Thème 6 : ingénierie agronomique	animateur	F. Flenet	18h00-19h00	Intre
Dîner			à partir de 19h45	

Journée du 18/03/2005				
		Orateur	**horaire**	**lieu**
Sessions plénières de la matinée du 18/03 conduites par P. Debaeke				
Session plénière thème 2 : Aide pour une bonne utilisation du modèle et paramétrage			8h15-9h15	Bord de mer
Généricité et adaptation à de nouvelles cultures		M. Launay	8h15-8h35	
Assimilation des paramètres sol par simulation de Ψbase		J.C. Payan	8h35-8h55	
Présentation des posters du thème 2		C. Gary	8h55-9h15	
Session plénière thème 5 : Itinéraires techniques			9h15-10h15	Bord de mer
Comment renseigner les ITK à large échelle		C. Godard	9h15-9h35	
Innovation technique : les cultures associées		G. Corre-Hellou	9h35-9h55	
Présentation des posters du thème 5		F. Affholder	9h55-10h15	
Pause café			10h15-10h45	Bar
Visite des posters thèmes 2, 5 et 7			10h45-11h30	Bord de mer
Tables rondes			11h30-12h30	
Thème 2 : Aide pour une bonne utilisation du modèle	animateur	M. Launay	11h30-12h30	Miejou Labe
Thème 5 : itinéraires techniques	animateur	M. Benoit	11h30-12h30	Intre
Repas			12h30-14h00	
Sessions plénières de l'après midi 18/03 conduites par M. Guérif				
Restitution des tables rondes par les animateurs			14h00-15h00	Bord de mer
Session plénière thème 7 : Les projets			15h00-16h00	Bord de mer
MOULTIPASS		P. Clastre	15h00-15h20	
Couplage de STICS avec un modèle de structure		F. Baret	15h20-15h40	
Présentation des posters du thème 7 et discussion		R. Faivre	15h40-16h00	
Conclusion du séminaire			16h00-16h10	
Pause café			16h10-16h30	
Départ			16h30	

Les tables rondes

1. **L'azote** : estimation des besoins en azote et du statut azoté des peuplements, efficience de l'engrais et réponse du rendement à l'engrais, interactions eau x azote, fonctionnement des nodosités des légumineuses, rôle du précédent cultural, variabilité intra-parcellaire du bilan d'azote…
2. **Aide pour une bonne utilisation du modèle et paramétrage** : adaptation du modèle à de nouvelles cultures, assimilation de données mesurées in situ ou par télédétection, bases de données et de paramètres, environnement du modèle,…
3. **Le long terme** : rotations, changements climatiques, devenir de la matière organique, simulation des plantes pérennes.
4. **Couplages avec d'autres modèles** : modèles spatiaux, temporels, modes de couplage ou d'interfaçage
5. **Itinéraires techniques** : les innovations (cultures associées, non-labour,…), comment renseigner les ITK à l'échelle régionale, adaptation des ITK aux changements climatiques, ITK comme sortie du modèle
6. **STICS, outil d'ingénierie agronomique** : expériences variées (instituts techniques, agrotransferts, INRA,…)

Un dernier thème sera consacré aux **projets** : introduction des stress biotiques, simulations multi spatiales et temporelles, générateur d'itinéraires techniques,…De plus, une table ronde parallèle à l'une des sessions de posters sera organisée sur **l'interface homme-machine** (Winstics).

Les participants aux tables rondes

Table ronde n° 1	
Azote	Couplage avec d'autres modèles
45 participants	49 participants
François AFFHOLDER	Jérôme BALESDENT
Nicolas BEAUDOIN	Edouard BARANGER
Anita BEHA	Frédéric BARET
Natalia BELLOSTAS MUGUERZA	Christian BARON
Halim BEN HAJ SALAH	Paul BERNARD
Pierre-yves BERNARD	Pascal BERTIN
Nadine BERTRAND	Nadine BRISSON
Roland BOSSENO	Stephane CEZERA
Florent BOUTIN	Xavier CHARDON
José ramón CARLÓN GÓMEZ	Mathieu CHEVALIER
Florian CELETTE	Philippe CLASTRE
Guénaëlle CORRE-HELLOU	Alain COUTURIER
Philippe DEBAEKE	Olivier CRESPO
Véronique DESFONDS	Nathalie DE NOBLET-DUCOUDRÉ
Audrey DIBET	Elodie DEBOVE
Benoit DUCHEMIN	Annie DUPARQUE
Jean-louis DURAND	Patrick DURAND
Frédéric FABRE	Robert FAIVRE
Patrick FELS	Benoit GABRIELLE
Francis FLÉNET	Christian GARY
Nicolas FLIPO	Caroline GODARD
Inaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI	Rachid HADRIA
Jean-pascal GOUTOULY	Carine HUE
Anne-isabelle GRAUX	Pierre-alain JAYET
Martine GUÉRIF	Marie LAUNAY
Karine GUY	Claire LAUVERNET
Antje HEUER	Christine LE BAS
Vianney HOULÈS	Isabelle LECOMTE
Carole ISBÉRIE	Frédéric LEVRAULT
Eric JUSTES	Anne-marie MARTINEZ
Damien LE SUEUR	Marcello MASTRORILLI
Sophie LEBONVALLET	Anne MEROT
Gilles LEMAIRE	Yann MEURDESOIF
Bruno MARY	Nathalie MOITRIER
Philippe MENTION	Nicolas MOITRIER
Sébastien MINETTE	Binta NIANG
Bertrand MULLER	Albert OLIOSO
Thomas NESME	Jean-claude POUPA
Virginie PARNAUDEAU	Alexandre RAT
Jean-christophe PAYAN	Dominique RIPOCHE
Jean-pierre RAMEL	Nathalie ROUSSE
Françoise RUGET	Ali SAHLI
Sylvain SATGER	Emmanuelle SAUBOUA
Pascal THIEBEAU	Nathalie SCHNEBELEN
Emmanuelle WEINZAEPFLEN	Pascalle SMITH
	Riadh TASCOU
	Héctor VALDÉS
	Christophe VIAVATTENE
	Daniel WALLACH

Table ronde n° 2	
L'Interface Homme-Machine	Session Posters
35 participants	59 participants
François AFFHOLDER	Frédéric BARET
Jérôme BALESDENT	Nicolas BEAUDOIN
Edouard BARANGER	Natalia BELLOSTAS MUGUERZA
Christian BARON	Halim BEN HAJ SALAH
Anita BEHA	Pascal BERTIN
Paul BERNARD	Nadine BERTRAND
Pierre-yves BERNARD	Roland BOSSENO
Mathieu CHEVALIER	Florent BOUTIN
Philippe CLASTRE	Nadine BRISSON
Alain COUTURIER	José ramón CARLÓN GÓMEZ
Olivier CRESPO	Florian CELETTE
Philippe DEBAEKE	Stephane CEZERA
Elodie DEBOVE	Xavier CHARDON
Benoit DUCHEMIN	Guénaëlle CORRE-HELLOU
Annie DUPARQUE	Nathalie DE NOBLET-DUCOUDRÉ
Patrick FELS	Véronique DESFONDS
Inaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI	Audrey DIBET
Christian GARY	Jean-louis DURAND
Caroline GODARD	Patrick DURAND
Jean-pascal GOUTOULY	Frédéric FABRE
Carole ISBÉRIE	Robert FAIVRE
Pierre-alain JAYET	Francis FLÉNET
Eric JUSTES	Nicolas FLIPO
Marie LAUNAY	Benoit GABRIELLE
Anne-marie MARTINEZ	Anne-isabelle GRAUX
Bruno MARY	Martine GUÉRIF
Marcello MASTRORILLI	Karine GUY
Nathalie MOITRIER	Rachid HADRIA
Nicolas MOITRIER	Antje HEUER
Bertrand MULLER	Vianney HOULÈS
Albert OLIOSO	Carine HUE
Dominique RIPOCHE	Claire LAUVERNET
Nathalie ROUSSE	Christine LE BAS
Pascal THIEBEAU	Damien LE SUEUR
Héctor VALDÉS	Sophie LEBONVALLET
	Isabelle LECOMTE
	Gilles LEMAIRE
	Frédéric LEVRAULT
	Philippe MENTION
	Anne MEROT
	Yann MEURDESOIF
	Sébastien MINETTE
	Thomas NESME
	Binta NIANG
	Virginie PARNAUDEAU
	Jean-christophe PAYAN
	Jean-claude POUPA
	Jean-pierre RAMEL
	Alexandre RAT
	Françoise RUGET

Table ronde n° 3	
Aide pour une bonne utilisation du modèle et paramétrage	Itinéraires techniques
52 participants	42 participants
Jérôme BALESDENT	François AFFHOLDER
Edouard BARANGER	Frédéric BARET
Christian BARON	Natalia BELLOSTAS MUGUERZA
Nicolas BEAUDOIN	Halim BEN HAJ SALAH
Anita BEHA	Nadine BERTRAND
Paul BERNARD	Florent BOUTIN
Pierre-yves BERNARD	Nadine BRISSON
Pascal BERTIN	Florian CELETTE
Roland BOSSENO	Stephane CEZERA
José ramón CARLÓN GÓMEZ	Guénaëlle CORRE-HELLOU
Xavier CHARDON	Olivier CRESPO
Mathieu CHEVALIER	Philippe DEBAEKE
Philippe CLASTRE	Audrey DIBET
Alain COUTURIER	Patrick DURAND
Nathalie DE NOBLET-DUCOUDRÉ	Patrick FELS
Elodie DEBOVE	Christian GARY
Véronique DESFONDS	Caroline GODARD
Benoit DUCHEMIN	Jean-pascal GOUTOULY
Annie DUPARQUE	Anne-isabelle GRAUX
Jean-louis DURAND	Martine GUÉRIF
Frédéric FABRE	Rachid HADRIA
Robert FAIVRE	Christine LE BAS
Francis FLÉNET	Gilles LEMAIRE
Nicolas FLIPO	Frédéric LEVRAULT
Benoit GABRIELLE	Sébastien MINETTE
Inaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI	Nathalie MOITRIER
Karine GUY	Nicolas MOITRIER
Antje HEUER	Bertrand MULLER
Vianney HOULÈS	Thomas NESME
Carine HUE	Binta NIANG
Carole ISBÉRIE	Albert OLIOSO
Pierre-alain JAYET	Virginie PARNAUDEAU
Eric JUSTES	Jean-christophe PAYAN
Marie LAUNAY	Jean-claude POUPA
Claire LAUVERNET	Jean-pierre RAMEL
Damien LE SUEUR	Dominique RIPOCHE
Sophie LEBONVALLET	Françoise RUGET
Isabelle LECOMTE	Sylvain SATGER
Anne-marie MARTINEZ	Emmanuelle SAUBOUA
Bruno MARY	Pascalle SMITH
Marcello MASTRORILLI	Pascal THIEBEAU
Philippe MENTION	Héctor VALDÉS
Anne MEROT	
Yann MEURDESOIF	
Alexandre RAT	
Nathalie ROUSSE	
Ali SAHLI	
Nathalie SCHNEBELEN	
Riadh TASCOU	
Christophe VIAVATTENE	

Table ronde n° 4	
Long terme	STICS, outil d'ingénierie agronomique
53 participants	38 participants
François AFFHOLDER	Jérôme BALESDENT
Edouard BARANGER	Halim BEN HAJ SALAH
Frédéric BARET	Pierre-yves BERNARD
Christian BARON	Pascal BERTIN
Nicolas BEAUDOIN	Nadine BERTRAND
Anita BEHA	José ramón CARLÓN GÓMEZ
Natalia BELLOSTAS MUGUERZA	Stephane CEZERA
Paul BERNARD	Mathieu CHEVALIER
Roland BOSSENO	Olivier CRESPO
Nadine BRISSON	Véronique DESFONDS
Florian CELETTE	Audrey DIBET
Xavier CHARDON	Patrick FELS
Philippe CLASTRE	Francis FLÉNET
Guénaëlle CORRE-HELLOU	Christian GARY
Alain COUTURIER	Jean-pascal GOUTOULY
Nathalie DE NOBLET-DUCOUDRÉ	Anne-isabelle GRAUX
Philippe DEBAEKE	Karine GUY
Elodie DEBOVE	Rachid HADRIA
Benoit DUCHEMIN	Vianney HOULÈS
Annie DUPARQUE	Carole ISBÉRIE
Jean-louis DURAND	Marie LAUNAY
Patrick DURAND	Claire LAUVERNET
Frédéric FABRE	Christine LE BAS
Robert FAIVRE	Damien LE SUEUR
Nicolas FLIPO	Frédéric LEVRAULT
Benoit GABRIELLE	Anne-marie MARTINEZ
Inaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI	Philippe MENTION
Caroline GODARD	Anne MEROT
Martine GUÉRIF	Sébastien MINETTE
Antje HEUER	Thomas NESME
Carine HUE	Binta NIANG
Pierre-alain JAYET	Virginie PARNAUDEAU
Eric JUSTES	Dominique RIPOCHE
Sophie LEBONVALLET	Nathalie ROUSSE
Isabelle LECOMTE	Ali SAHLI
Gilles LEMAIRE	Sylvain SATGER
Bruno MARY	Riadh TASCOU
Marcello MASTRORILLI	Daniel WALLACH
Yann MEURDESOIF	
Bertrand MULLER	
Albert OLIOSO	
Jean-christophe PAYAN	
Jean-claude POUPA	
Jean-pierre RAMEL	
Alexandre RAT	
Françoise RUGET	
Emmanuelle SAUBOUA	
Nathalie SCHNEBELEN	
Pascalle SMITH	
Pascal THIEBEAU	

1. L'azote

Animateur table ronde : B. Mary

Estimation des besoins en azote et du statut azoté des peuplements, efficience de l'engrais et réponse du rendement à l'engrais, interactions eau x azote, fonctionnement des nodosités des légumineuses, rôle du précédent cultural, variabilité intra-parcellaire du bilan d'azote…

Courbes de dilution de l'azote : formalisation du passage de la plante isolée au peuplement dense.

Gilles LEMAIRE
INRA Lusignan
et
Nadine BRISSON
INRA Avignon

Introduction

Les courbes de dilution critiques de l'azote, représentant la diminution, avec la croissance, du minimum de teneur en azote (%Nc) d'un peuplement permettant la croissance maximum en biomasse (W),

$$\%N_c = a_c W^{-b} \qquad (1)$$

et leurs analogues, les courbes de prélèvement critiques en azote,

$$N_c = a_c W^{1-b} \qquad (2)$$

ont été déterminées à partir de données obtenues sur des peuplements denses. Lorsque l'on extrapole ces courbes pour des biomasses faibles du peuplement, c'est-à-dire pour des conditions où les plantes individuelles peuvent être encore considérées comme « isolées », on obtient une forte surestimation de la teneur en azote critique et des quantités d'azote prélevées en tout début de croissance des cultures. Pour remédier à cette surestimation, le modèle STICS, sur la base des données expérimentales de Justes et al. (1994) sur le blé, propose pour les biomasses inférieures à 1,54 t/ha de plafonner la valeur de $\%N_c$ et la maintenir constante, ce qui *de facto* rend la valeur de N_c proportionnelle à W pour W<1,54 t/ha. Cependant, les résultats de Lemaire et Gastal (1997) sur le sorgho ont montrés que même pour des plantes isolées la teneur en azote diminue lors de leur croissance. Ces auteurs ont même montré que pour une culture de sorgho avant d'avoir atteint la biomasse de 1,0 – 1,5 t/ha, la dilution de l'azote des plantes de la culture étaient rigoureusement identiques à celle de plantes isolées avec une valeur de $b_i = 0,10$ plus faible que la valeur obtenue en peuplement dense $b_d = -0,34$ à -0,44 selon les espèces. Des résultats plus récents obtenus sur luzerne (Lemaire et al. 2005) montrent également que cette valeur de $b_i = -0,15$ est obtenue pour des plantes isolées cultivées en conditions contrôlées.

L'objectif de cet article est (i) d'élucider les mécanismes qui sont à la base de ce changement de vitesse de dilution de l'azote lorsque l'on passe de la plante « quasi isolée » en début de culture à la plante à la plante en compétition au sein de la culture, et (ii) de proposer en conséquence un formalisme plus réaliste de la dilution dans le modèle STICS qui permettent de simuler la dynamique de prélèvement d'azote par la culture depuis la levée.

La dynamique de prélèvement d'azote par une culture est contrôlée par la dynamique d'expansion de l'Indice Foliaire

Pour analyser le phénomène de dilution, il est nécessaire de revenir aux mécanismes élémentaires qui le gouvernent c'est-à-dire (i) l'accumulation de N dans la plante et (ii) la croissance en matière sèche. C'est donc à partir de l'équation (2) qu'il convient de raisonner.

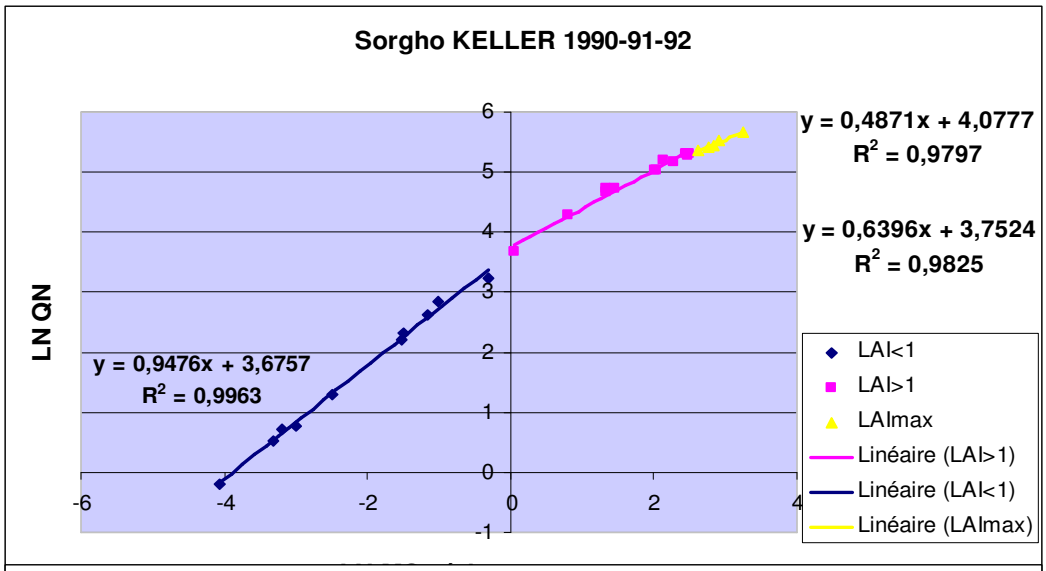
Ainsi le coefficient d'allométrie 1-b représente le rapport entre la vitesse relative d'accumulation de l'azote dans la plante dN/Ndt et la vitesse relative de croissance de cette même plante dW/Wdt :

$$1\text{-}b = (dN/N)/(dW/W) \qquad (3)$$

Si b=0 cela implique que N est proportionnel à W et il n'y a alors pas de dilution. Pour une plante isolée b_i = 0,10-0,15, donc 1-b_i = 0,90-0,85, l'accumulation d'azote est donc plus rapide relativement à la croissance que pour une plante en peuplement dense b_d = 0,34 et 1-b_d = 0,66.

D'où vient cette différence ? La figure 1a nous montre que pour une culture de sorgho, la dynamique d'accumulation de l'azote par rapport à la croissance, donc la dilution de l'azote, peut être considérée selon trois phases : (i)une première phase allant de la levée jusqu'à une biomasse du peuplement d'environ 1,0 t/ha avec une accumulation relative de N élevée et donc une dilution faible; (ii) une deuxième phase allant de W=1,0 t/ha (LnW=0) jusqu'à la date où l'indice foliaire de la culture devient maximum et où l'accumulation relative d'azote s'infléchit nettement, et donc la dilution s'accélère; et (iii) une troisième phase où l'accroissement de biomasse de la culture correspond à l'accumulation de MS dans les grains et où la dilution s'accélère encore davantage.

a



b

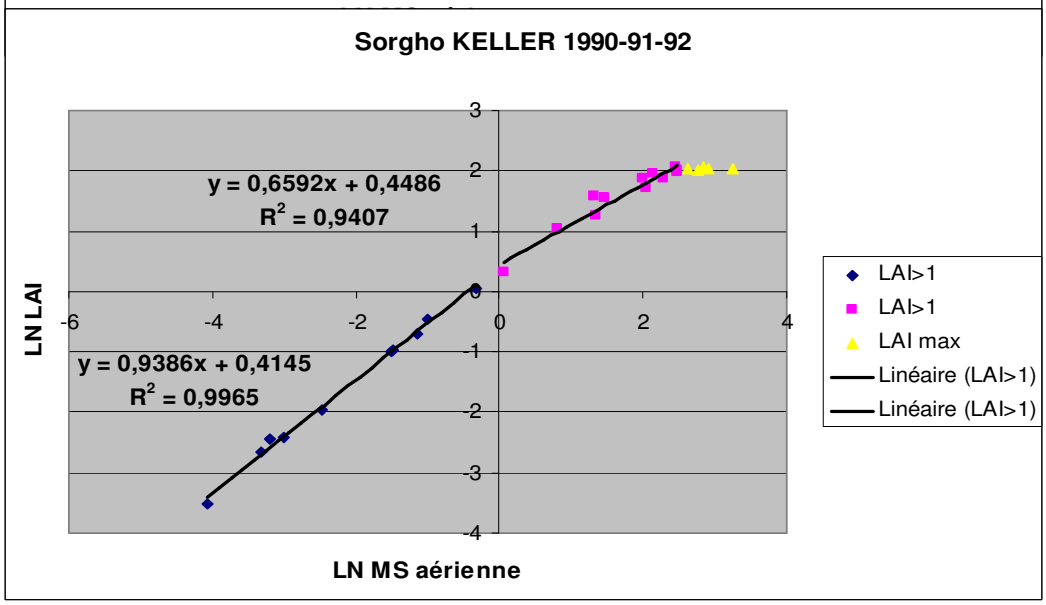


Figure 1 : a) relation entre quantité de N prélevé (QN) et biomasse (W) d'un peuplement de sorgho ; b) relation entre LAI et biomasse (W).

Si l'on exclut cette troisième phase pour laquelle des mécanismes complexes de remplissage des grains et de remobilisation de l'azote foliaire sont en jeu et peuvent expliquer cette rupture de pente, on peut se concentrer sur la première rupture constatée dans la dynamique d'accumulation de l'azote.
La figure 1b montre que cette rupture est concomitante avec le changement de la dynamique de croissance en surface foliaire relativement à la biomasse qui se produit pour un Indice Foliaire légèrement supérieur à 1 (LnLAI=0) et une biomasse de 1,0 t/ha. Les pentes des deux séries de courbes sont très proches l'une de l'autre. Il est alors possible de proposer une relation linéaire et strictement proportionnelle (c'est-à-dire passant par l'origine) entre l'accumulation de l'azote par la culture et l'indice foliaire Figure 2.

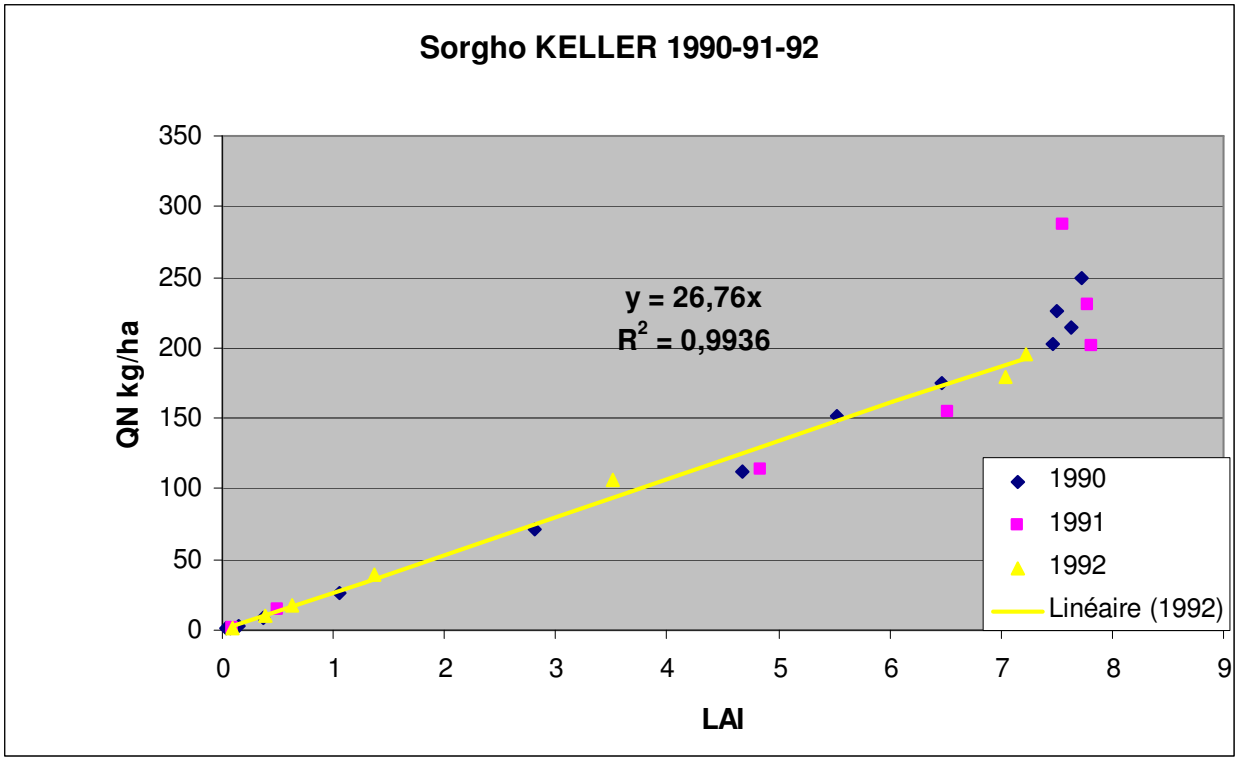


Figure 2 : Relation entre la quantité d'azote prélevé (QN) et l'indice foliaire (LAI) pour une culture de sorgho.

Au-delà de IF= max, l'accumulation d'azote correspond à la phase trois et elle est pilotée par la croissance reproductrice. On sort alors du domaine de validité des courbes de dilution qui doivent être strictement restreintes à la croissance végétative. Ainsi, la rupture de pente dans la dynamique d'accumulation d'azote et donc dans la dynamique de dilution entre la phase initiale de croissance de plantes « quasi isolées » et la phase suivante de croissance en peuplement dense est déterminée par une modification de la croissance relative en surface foliaire de la plante par rapport à sa croissance en matière sèche. Cette modification de l'allométrie entre surface foliaire et biomasse de la plante serait une conséquence de la compétition pour la lumière entre les plantes. La plante « isolée » maximiserait ainsi sa croissance en surface foliaire pour optimiser l'interception du rayonnement (coefficient

d'allométrie de 0,95 entre surface foliaire et biomasse), tandis que la plante en peuplement dense pour avoir accès à la lumière est obligée d'augmenter sa croissance « verticale » ce qui conduit à un coefficient d'allométrie d'environ 0,66 entre surface foliaire et biomasse. Cette valeur d'environ 2/3 du rapport entre la croissance relative foliaire et la croissance relative en biomasse correspond à une croissance « isométrique », c'est-à-dire ayant une valeur relative égale dans les trois dimensions, si l'on admet en première approximation que la densité de la biomasse est constante. Cette croissance « isométrique » semble être la règle pour l'ensemble des peuplements végétaux en croissance végétative, ce qui semble correspondre à une optimisation de la forme et de l'architecture des plantes en situation de compétition pour la lumière.

Des résultats analogues ont été obtenus sur différentes variétés de blé (Figure 3).

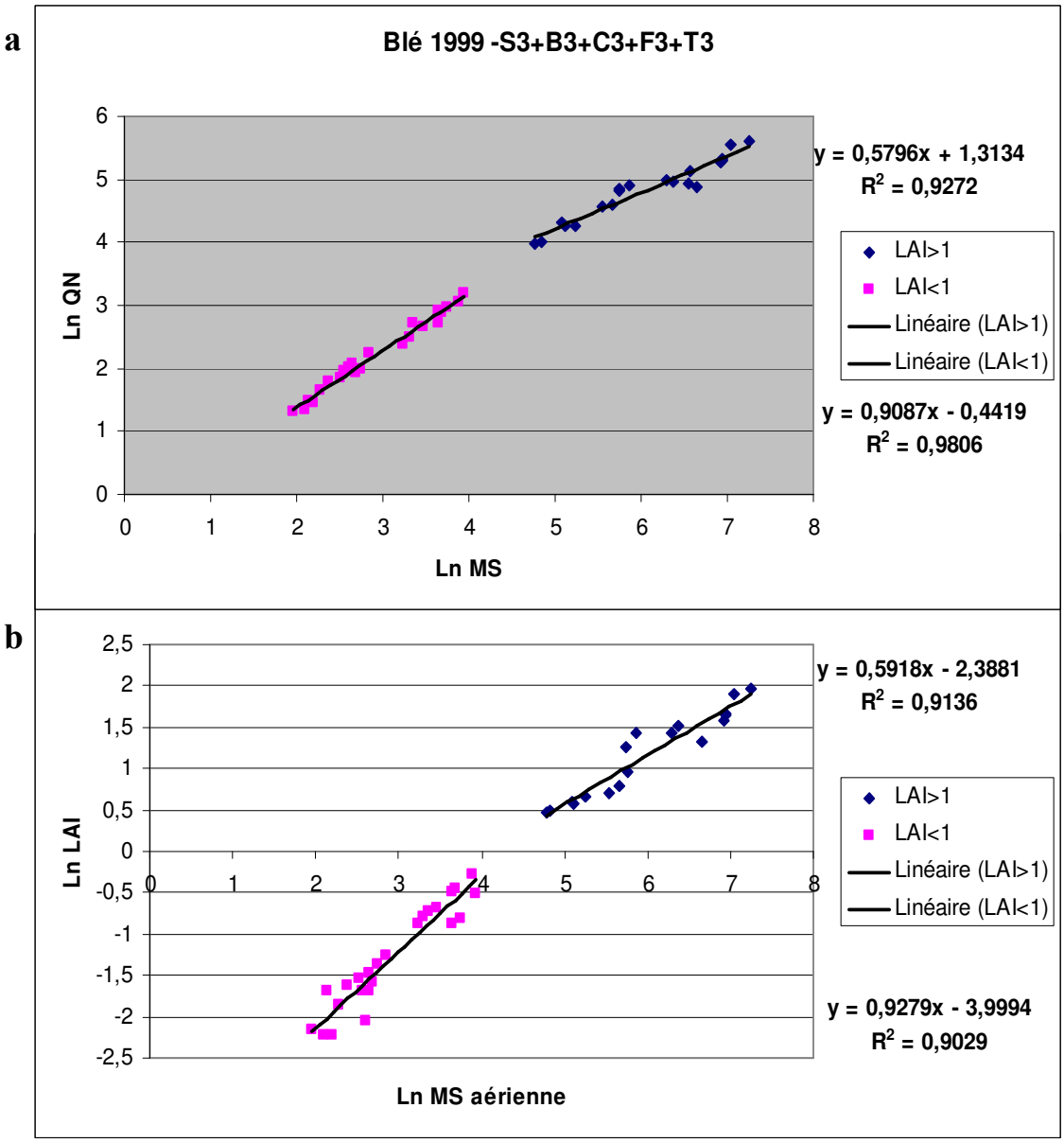


Figure 3 : a) relation entre l'accumulation d'azote (QN) et la Biomasse (MS) pour 5 variétés de blé (Soisson, Baltimore, Cockpit, Florence Aurore et Trémie) cultivés à l'optimum de nutrition azotée ; b) relation entre la croissance de l'Indice Foliaire (LAI) et la croissance en MS pour les mêmes variétés ; (données non publiées, MH Jeuffroy)

On constate là encore que les pentes des deux séries de courbes sont très proches. Ainsi une relation linéaire peut être établie entre l'accumulation d'azote dans le couvert végétal et l'indice foliaire (Figure 4). On peut constater l'absence de différence entre les pentes pour les 5 variétés malgré des différences importante d'architectures.

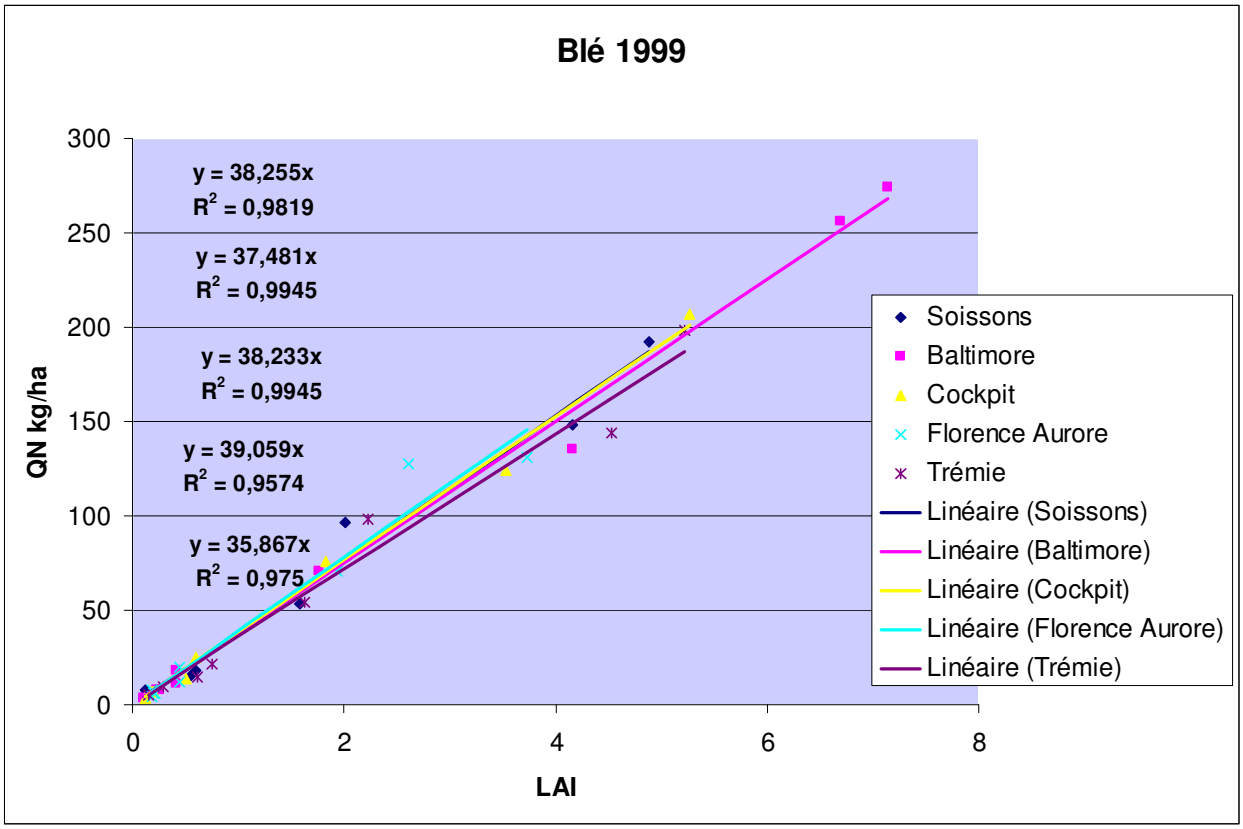


Figure 4 : Relation entre l'accumulation d'azote QN et l'indice foliaire LAI pour différentes variétés de blés cultivées à l'optimum de nutrition azotée (données non publiées, MH Jeuffroy).

Ainsi on peut considérer que durant la croissance végétative d'un peuplement, l'expansion foliaire contrôle la dynamique d'accumulation d'azote dans une culture, et ceci tout au long de la période de croissance végétative. La modification de la croissance relative foliaire par rapport à la croissance relative en biomasse des plantes lorsqu'elles passent de conditions de plantes isolées à des conditions de compétition pour la lumière ne modifie pas la relation de proportionnalité entre l'accumulation d'azote QN et l'indice foliaire LAI. Par contre la compétition pour la lumière entre plantes se traduit par un ralentissement relatif de l'accumulation d'azote par rapport à l'accroissement de biomasse (diminution du coefficient 1-b de l'équation (2)) puisque chaque nouvelle unité de surface foliaire produite est accompagnée d'une quantité supérieure de tissus de soutien, non photosynthétiques et donc pauvres en azote permettant à ces tissus foliaires d'être positionnés dans les strates éclairées du couvert végétal. Cette régulation de l'accumulation de N par la croissance foliaire a également été montrée à l'échelle de la plante individuelle au sein d'un couvert dense (Lemaire et al. 2005). D'un point de vue physiologique ceci peut être expliqué (i) d'une part par le rétro contrôle positif des transporteurs racinaires par les sucres issus de la photosynthèse et (ii) d'autre part par le rétro contrôle négatif de ces mêmes transporteurs par l'azote organique non utilisé par la croissance et qui recircule vers les racines via le phloème (Lemaire et Millard, 1999).

Proposition d'un nouveau formalisme de la dilution de N dans STICS

Courbes de dilution critiques

Les courbes expérimentales obtenues sur les différentes espèces, blé (Justes et al.1994), maïs (Plénet et Lemaire, 1999), colza (Colnenne et al. 1998) restent naturellement inchangées et conformes à l'équation 1 :

$$\%N_{cd} = a_{cd}W^{-bcd} \qquad (4)$$

en ajoutant l'indice « c » pour « critique » et « d » pour « dense ».
Pour la phase « plantes isolées » le formalisme est le même, avec l'indice « i » :

$$\%N_{ci} = a_{ci}W^{-bci} \qquad (5)$$

D'après les données des figures 1 et 3 la valeur de « b_{ci} » est proche de 0,10. Pour estimer la valeur de « a_{ci} » on fait l'hypothèse que pour le blé, pour une valeur « initiale » de W=0,04t/ha (Mary, communication personnelle) la totalité de l'azote des jeunes plantes est composée d'azote métabolique, N_m. Pour le blé $\%N_m = 6,5$ (Mary, non publié, in Lemaire et Gastal 2007). Dans ce cas :

$$a_{ci} = \%N_m/(0,04)^{-0,1} \qquad (6)$$

Ainsi le point d'intersection (W_{id}) entre les courbes (4) et (6) peut être déterminé (Figure 5).

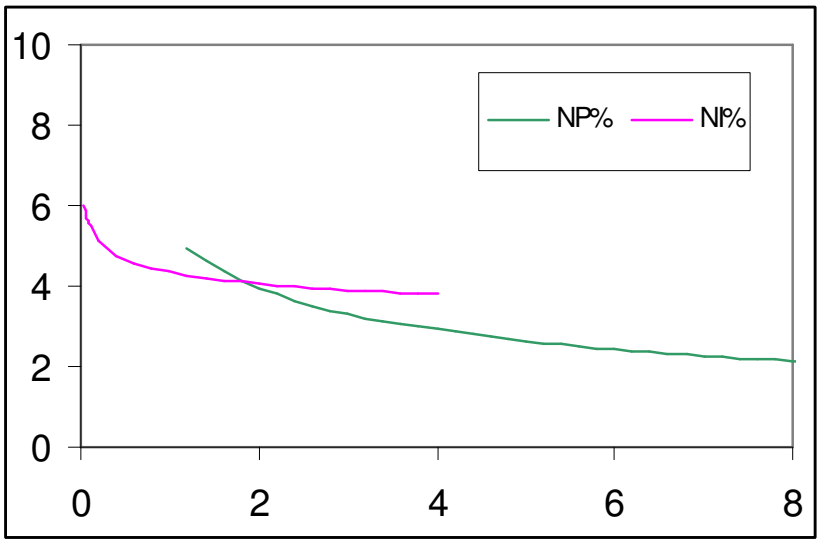


Figure 5 : Représentation des deux courbes de dilution critique, pour les plantes isolées NI% et pour les plantes en peuplement dense NP%. Simulation avec valeurs de %Nm = 6 et bci = 10.

Courbes de dilution maximales

Ces courbes sont essentielles dans STICS puisqu'elles déterminent la capacité maximale de prélèvement d'azote par la culture. Elles ont été pour l'instant estimées comme la courbe enveloppe maximum des teneurs en azote observées au champ (Justes et al. 1994 ; Plénet et Lemaire, 1999). Cette détermination est bien entendu contingente des bases de données utilisées. Nous essayons ici d'avoir une approche plus explicative de ces courbes. La formulation de cette courbe en peuplement dense est la suivante :

$$\%N_{maxd} = a_{maxd}W^{-bmaxd} \qquad (7)$$

La première hypothèse que nous formulons est que b_{maxd} et b_{cd} sont égaux. Ceci est cohérent avec le fait que l'absorption de l'azote est rétro régulé par la croissance foliaire.
La deuxième hypothèse est que : $\%N_{maxid} = \%N_{cid} + \%N_r$ (8)

au point d'intersection (W_{id}) entre les deux courbes (4) et (6). Ceci traduit le supplément de teneur lié à l'azote de « réserve » non nécessaire à la croissance que la plante est capable d'accumuler dans sa biomasse. On a alors :

$$a_{maxd} = a_{cd} + \%N_r/(W_{id})^{-bcd} \qquad (9)$$

La troisième hypothèse concerne la partie plante isolée. Elle consiste à supposer que à l'origine c'est-à-dire pour W = 0,04 t/ha la valeur de %Nr est nulle. Ceci revient à dire que la plantule initiale n'a pas de réserve d'azote une fois acquise son autotrophie. Alors on peut écrire :

$$a_{maxi} = \%N_m/(0{,}04)^{-bmaxi} \qquad (10)$$

La valeur de b_{maxi} peut alors être estimé par :

$$b_{maxi} = Ln(\%N_m/\%N_{maxid})/Ln(0{,}04/W_{id}) \qquad (11)$$

A partir de ces différentes équations il est alors possible, en fixant la valeur de $\%N_m$ et de $\%N_r$, de simuler l'évolution des deux courbes de dilution « critique » et « maximale ».

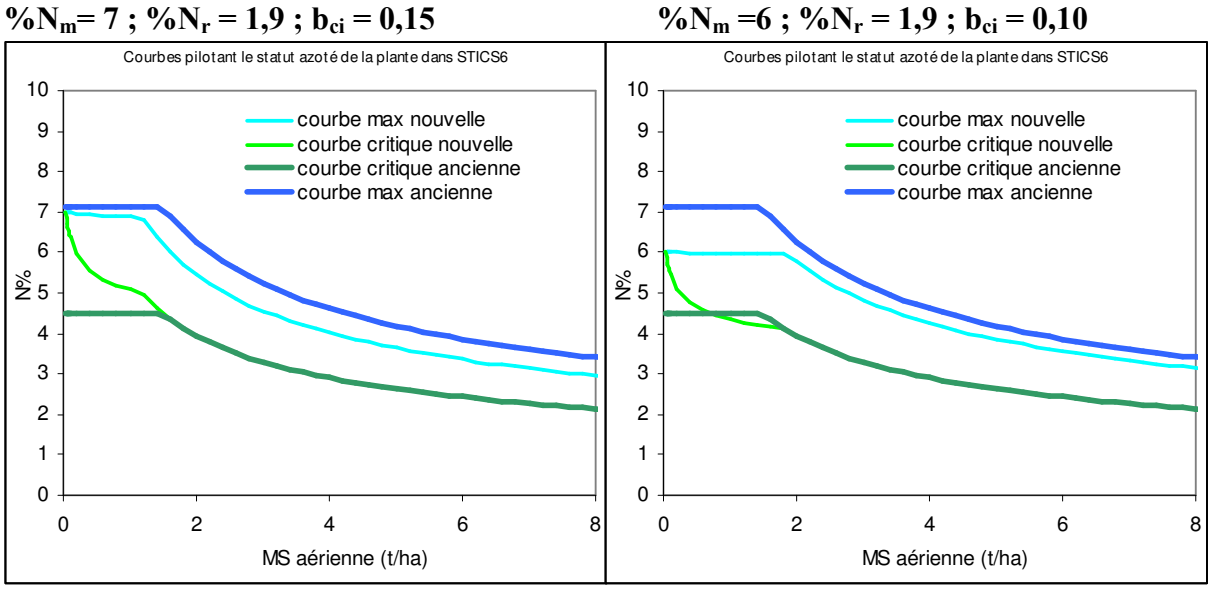


Figure 6 : Comparaison de l'ancienne et de la nouvelle formalisation des courbes de dilution de Stics pour différentes valeurs de paramètres.

Conclusion

Les données expérimentales nouvelles confirment que la régulation de l'absorption de N par une plante se fait en fonction de la vitesse d'expansion de sa surface foliaire. Cette régulation est monotone pendant toute la phase de croissance végétative de la plante, depuis le stade plantule autotrophe jusqu'à l'obtention de l'indice foliaire maximal de la culture. La rupture observée dans la dynamique de dilution de l'azote s'explique alors par une modification du rapport d'allométrie entre la surface foliaire des plantes et leur biomasse lorsqu'elles passent des conditions de plantes quasi isolées à des conditions de compétition pour la lumière. Cette modification intervient pour des Indices Foliaires légèrement supérieurs à 1 ce qui correspond à des biomasses du peuplement de 1,0 à 1, 5 t/ha selon les espèces. En utilisant un minimum d'hypothèses, il est alors possible de simuler de manière plus réaliste les deux cinétiques de dilution « critiques » et « maximales » qui permettent de déterminer dans STICS (i) l'indice de nutrition azotée de la culture INN, et (ii) la capacité maximum d'accumulation d'azote par

la culture à tous les stades de son développement végétatif. A cette occasion, il est nécessaire de rappeler que les bases théoriques de la dilution de l'azote et le formalisme qui en découle ne sont applicables strictement que durant la phase de croissance végétative des cultures. Au-delà de l'indice foliaire maximum, il est nécessaire de connaître (i) les mécanismes couplés de remplissage des grains en amidon, lipides et protéines, et (ii) les mécanismes de remobilisation de l'azote foliaire, pour pouvoir représenter de manière satisfaisante la dynamique de prélèvement d'azote.

Références

Colnenne C., Meynard J-M., Reau R., Justes E., Merrien A., (1998). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. Annals of Botany, 81: 311-317.
Justes E., Mary B., Meynard J.M., Machet J.M., Thelier-Huchet L. (1994) Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. Annals of Botany, 74:397-407.
Lemaire G., Gastal F., (1997). N uptake and distribution in plant canopies. In: Gilles Lemaire (ed): *Diagnosis of the nitrogen status in crops.* Springer-Verlag, Berlin, 3-44.
Lemaire G., Millard P., (1999). An ecophysiological approach to modelling resource fluxes in competing plants. Journal of Experimental Botany. 50:15-28.
Lemaire G., Avice J-C., Kim T-H., Ourry A., (2005). Developmental changes in shoot N dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) in relation to leaf growth dynamics as a function of plant density and hierarchical position within the canopy. Journal of Experimental Botany (in press).
Plénet D., Lemaire G. (1999). Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. Plant and Soil, 216: 65-82.

Effet du stress azoté sur la plante : Définition d'un indice de nutrition instantané

B. Mary*, M. Guérif**

* *INRA, unité d'agronomie de Laon-Reims-Mons, Rue Fernand Christ, 02007 Laon cedex*
** *INRA, unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9*

Introduction

Les travaux menés à l'INRA dans les vingt dernières années ont montré l'intérêt et la robustesse du concept de "courbe de dilution critique" pour diagnostiquer l'état de nutrition azotée d'un peuplement végétal. Ce concept a permis à Lemaire et Meynard (1997) de proposer un "indice de nutrition azotée" (*INN*) défini comme suit:

$$INN = \frac{N\%}{N\%_C} = \frac{N}{N_C} \qquad (1)$$

N% désigne la teneur en azote (% MS) et *N* la quantité d'azote (kg N ha^{-1}) des parties aériennes de la plante; $N\%_C$ désigne la teneur critique et N_C la quantité critique d'azote (kg N ha^{-1}) correspondant à la biomasse aérienne de la plante. L'*INN* s'avère intéressant pour quantifier le stress azoté d'une plante. Il est utilisé dans STICS pour simuler l'impact du stress azoté sur la vitesse d'émission de surface foliaire (facteur *INNLAI*), sur l'efficience de conversion du rayonnement en biomasse (facteur *INNS*) et sur la vitesse de sénescence foliaire (facteur *INNSENES*).

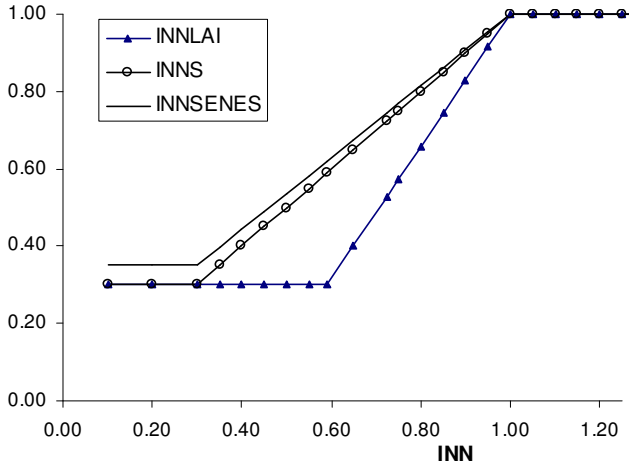


Figure 1. Indices de stress utilisés dans STICS en fonction de l'indice de nutrition azoté

Problème rencontré

Cet indice de nutrition azotée est le rapport de 2 quantités qui sont intégratrices. C'est donc un indice cumulé. Il peut permettre de bien décrire des situations qui évoluent de façon monotone, comme le sont un bon nombre d'essais de fertilisation azotée. Par contre, il nous paraît inadapté pour décrire des situations de levée de carence faisant suite à un fort stress azoté. La figure 2 en donne une illustration théorique : elle montre une culture de blé qui est carencée précocément en azote (jusqu'à une biomasse de 6.5 t ha^{-1}), avec un plafonnement de la quantité d'azote. Lorsqu'on lève la carence en azote (par un apport d'azote ou d'eau), l'absorption reprend fortement, mais la quantité cumulée d'azote reste en dessous de la courbe critique. Il en résulte que l'*INN* reste toujours inférieur à 1 et que par suite, les indices

trophiques (*INNLAI* et *INNS*) restent également inférieurs à 1. Le modèle simule donc encore des freins importants malgré la reprise d'absorption: frein sur la croissance foliaire, frein sur la conversion du rayonnement. Le frein peut rester très longtemps actif, jusqu'à la maturité. Il en résulte une très forte diminution de biomasse, qui peut être très exagérée.

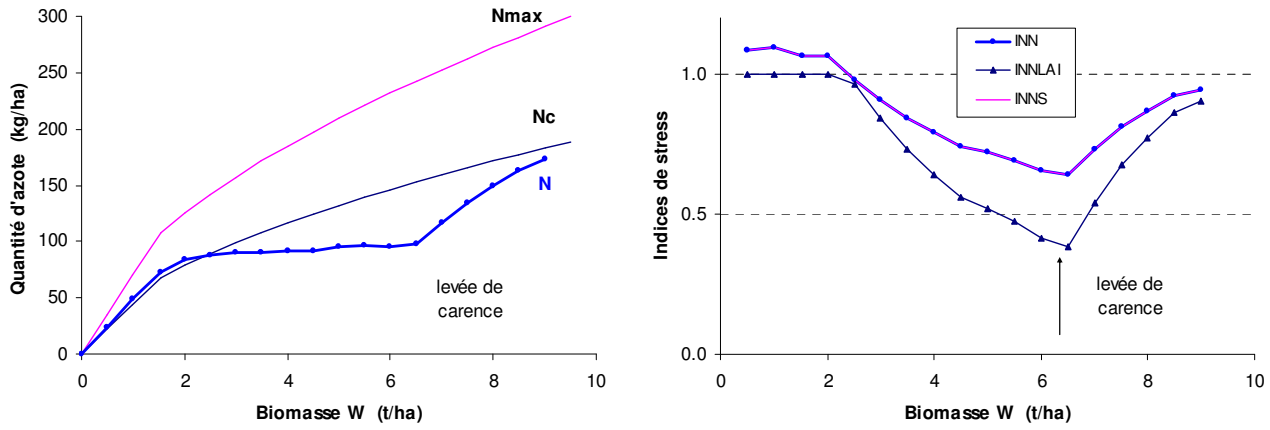


Figure 2. Exemple de trajectoire (N,W) et conséquence sur les indices de stress.

Proposition : définition d'un *INN* "instantané"

Pour résoudre ce problème, nous proposons de définir un indice de nutrition azotée instantané (*INNI*). Au lieu d'être un rapport un rapport de quantités cumulées d'azote, *INNI* est un rapport de variation instantanée (journalière) de ces quantités :

$$INNI = \frac{dN/dt}{(dN/dt)_C} \qquad (2)$$

INNI est le rapport entre la vitesse d'absorption effective et le "besoin" en azote, c'est-à-dire la vitesse d'absorption minimale permettant d'avoir la croissance maximale. Ce "besoin" peut être relié à la courbe de dilution "critique" :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_C = \left(\frac{dN}{dW}\right)_C \left(\frac{dW}{dt}\right)_C \qquad (3)$$

Le premier terme de cette équation représente la pente de la courbe N_C (figure 2a). Le second terme représente la vitesse de croissance maximale, c'est-à-dire en absence de stress azoté.

Le numérateur de l'équation (2), c'est-à-dire la vitesse d'absorption effective, est égale au minimum de "l'offre du sol" et de la "demande en azote". L'offre du sol dépend à la fois de la concentration en nitrate du sol, de la densité racinaire et du flux convectif d'eau vers la racine, pour chaque couche de sol. Quant à la demande, elle est définie à partir de la courbe de dilution maximale :

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\max} = \left(\frac{dN}{dW}\right)_{\max} \left(\frac{dW}{dt}\right)_{\max} \qquad (4)$$

soit, puisque la croissance est maximale entre la courbe critique et la courbe maximale:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\max} = \left(\frac{dN}{dW}\right)_{\max} \left(\frac{dW}{dt}\right)_C \qquad (5)$$

<u>Cas particulier</u>: si l'offre du sol est pléthorique, suite à une bonne alimentation en eau et une forte quantité d'azote, on a alors :

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dW}\right)_{\max} \left(\frac{dW}{dt}\right)_C \qquad (6)$$

En comparant les équations (2) et (6), on obtient:

$$INNI = \frac{(dN/dW)_C}{(dN/dW)_{\max}} \qquad (7)$$

C'est la valeur maximale de l'*INNI*. Si l'on prend le cas des céréales, avec le paramétrage proposé par Justes *et al*. (1994), on montre facilement que:

$$INNI_{\max} = \frac{adilmax}{adil} = 1.59 \qquad (8)$$

Application: cas de la sécheresse du printemps 2003

Les figures 3 et 4 montrent l'évolution simulée de l'indice foliaire et de la biomasse aérienne sur une parcelle agricole en blé d'hiver à Chambry en 2003 (parcelle "agriculture de précision"; Houlès *et al.*, 2005). Le climat a été particulièrement sec en fin d'hiver et début de printemps, de sorte que le blé était très carencé en azote, malgré un apport antérieur de 160 kg N ha^{-1}. L'arrivée de la pluie à la fin avril (jour 208) a permis de lever la carence. L'indice foliaire simulé avec le modèle standard ("*INNcum*") atteint un très faible niveau (1.45) , alors que les mesures atteignent 4.6. De même la biomasse aérienne maximale simulée (5 t ha^{-1}) est très inférieure aux mesures (11.5 t ha^{-1}).

Nous avons modifié STICS pour tester l'option *INN* instantané, avec un seul paramétrage (*innturgmin*=*innmin*=0.6). La simulation obtenue est bien meilleure car elle permet d'atteindre un *LAI* de 4 et une biomasse de 10 t ha^{-1}. Le modèle simule effectivement une remontée quasi instantanée du INNI après la pluie, alors que INN cumulé reste inférieur à 0.75 jusqu'à la récolte.

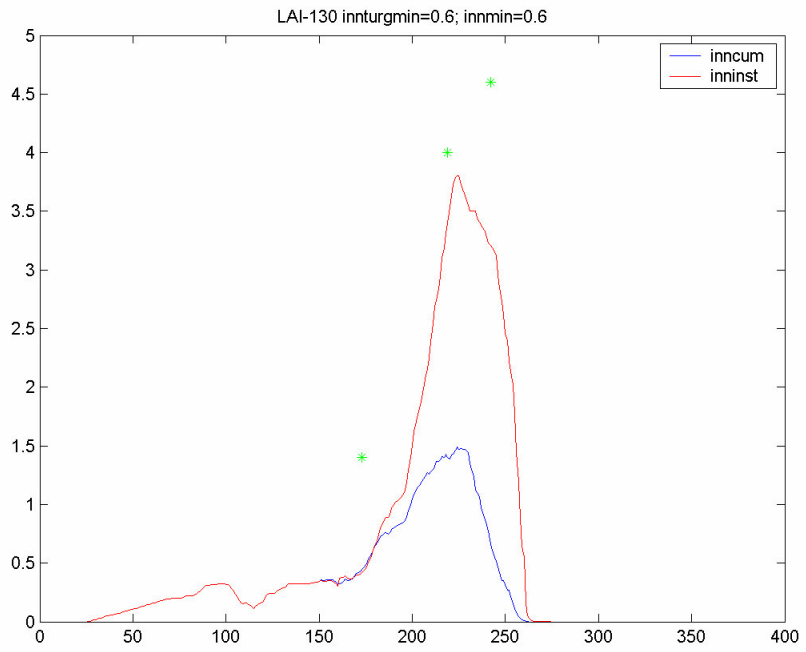


Figure 3. Indice foliaire simulé et observé à Chambry en 2003 (pixel n°134). L'indice de stress est calculé soit à partir de l'INN cumulé (modèle standard), soit de l'INN instantané (nouvelle option).

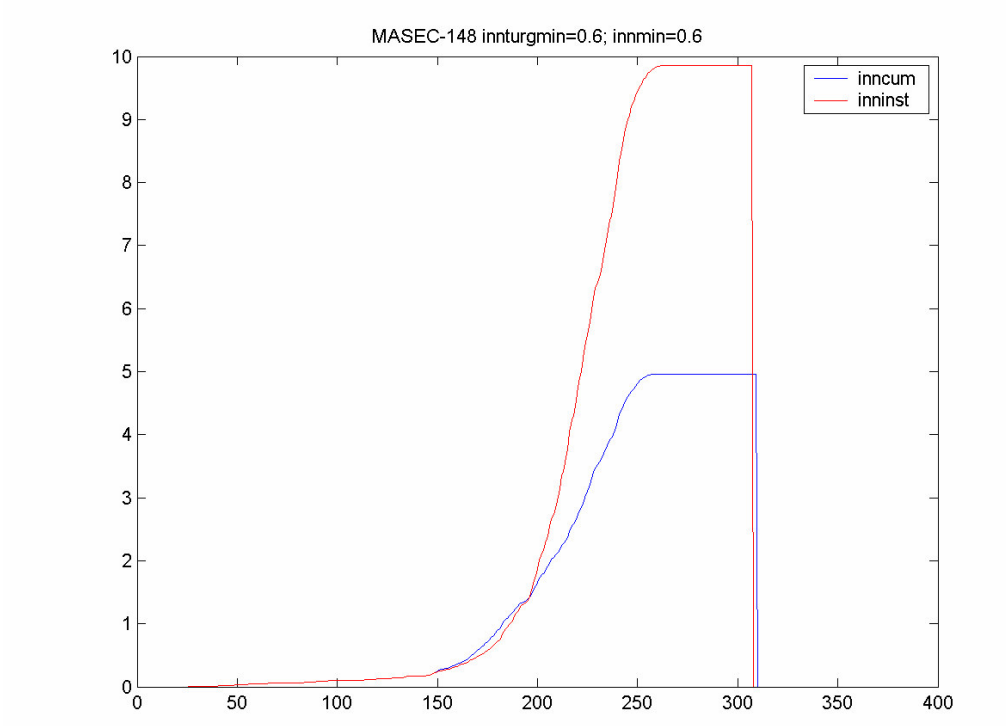


Figure 4. Biomasse aérienne(t ha^{-1}) simulée à Chambry en 2003 (pixel n°134). L'indice de stress est calculé soit à partir de l'INN cumulé (modèle standard), soit de l'INN instantané (nouvelle option).

Conclusion

L'indice de nutrition azotée instantané (*INNI*) que nous proposons semble beaucoup mieux à même de simuler des variations rapides de nutrition azotée que l'*INN* classique, notamment le cas d'une levée de carence suite à un stress azoté. Cet indice est homogène aux indices de stress hydrique (*turfac* et *swfac*) alors que l'*INN* cumulé ne l'est pas. Il reste cependant à calibrer les indices de stress en fonction de *INNI*, voire même à recalibrer certains autres paramètres du modèle pour obtenir des performances de simulation au moins aussi bonnes que les performances actuelles. Pour cela il est indispensable de disposer d'une large base de données et de procédures automatiques permettant de comparer très rapidement les performances du modèle pour différents jeux de paramètres.

Références

Devienne-Barret F, Justes E, Machet JM, Mary B (2000) Integrated control of nitrate uptake by crop growth rate and soil nitrate availability under field conditions. *Annals of Botany* 86, 995-1005.

Houlès V., Mary B., Guérif M. (2005) Gestion intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé par spatialisation du modèle de culture STICS. Comparaison d'une approche par cartographie pédologique et par assimilation de données de télédétection. In: *Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures*, M. Guérif (éd.), Science Update, INRA Editions, sous presse.

Justes E., Mary B., Meynard JM., Machet JM., Thellier L. (1994) Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74: 397-407.

Lemaire G., Meynard JM. (1997) Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In: Lemaire G. (ed.) *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Springer-Verlag, Berlin.

Etat azoté précoce du blé dur et aide à la décision

H. BEN HAJ SALAH[1]*, A. SAHLI[1], O. BEN ALI[1] , N. FADHEL[1] et K LATIRI[2]

[1]*Institut National Agronomique de Tunisie (43, Avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis Mahrajène, Tunisie).* [2]*Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie*

**Corresponding author email: halimbhs@yahoo.com*

Mots clés : Blé, déficit azoté, Tallage, Chlorophyllomètre HNT.

Introduction

L'analyse des pratiques des agriculteurs en Tunisie (Latiri et *al*., 1998) a montré que le premier apport d'engrais azoté est apporté tardivement après la phase de tallage alors qu'il est conseillé dés le stade début tallage (3 feuilles). Le fait de retarder le premier apport d'azote peut donc être une source de limitation du rendement puisque la formation de l'épi commence dés le stade début tallage (Jeuffroy et bouchard 1999). Les raisons du report du premier apport azoté sont liées au fait que d'une part l'agriculteur attend le mois de décembre pour fixer son objectif de rendement qui dépend généralement des pluies automnales et d'autre part les agriculteurs considèrent que la fourniture du sol peut subvenir aux besoins des plantes pendant les premières phases du cycle.

Afin d'éviter l'hésitation des agriculteurs pour la prise de décision concernant la réalisation du premier apport d'azote; et pour mieux ajuster les apports aux besoins pendant la phase de tallage (3 feuilles), il est donc nécessaire de développer des outils d'aide à la décision pour les stades précoces. Ces dernières années le chlorophyllomètre (Hydro N tester ou SPAD) a été développé en Europe pour le conseil de la fertilisation azotée et particulièrement pour le raisonnement de la troisième fraction (Denuit *et al.* 2002).

Le travail menée était donc de mettre en évidence les conséquences d'un déficit azoté précoce sur la croissance des plantes et de tester la possibilité d'utilisation du chlorophyllomètre comme indicateur de l'état azoté précoce des plantes.

Matériels et méthodes :

Des essais en pots ont été misent en place avec des niveaux de fertilisation azotée contrastées pendant la phase de tallage (3-6 Feuilles). Le cultivar de blé dur Karim (le plus cultivée en Tunisie, 80% des emblavures) a été utilisé pour cette étude. L'état azoté des plantes a été caractérisé par la détermination des teneurs en azote des feuilles. La méthode Kjeldhal (Bremner 1965) a été utilisée. Les indices de nutritions azotées ont été par la suite calculés. Le chlorophyllomètre Hydro N-tester (HNT) a été utilisée pour la détermination des valeurs chlorophyllométrique (valeurs HNT). De même les teneurs en chlorophylle dans les feuilles ont été mesurées par la méthode d'Arnon (1949). La biomasse aérienne a été évaluée pour les principaux stades repères du blé (fin tallage ou épi à 1cm, mi-montaison ou 2noeud, floraison et maturité). Les mesures de l'état azoté des plantes ont été réalisées entre les stades 3 feuilles (début tallage) et 6 feuilles (fin tallage) avec une fréquence hebdomadaire.

Résultats

Les résultats obtenus ont permis de montrer que les traitements appliqués ont entraîné des états azotés contrastés pendant la phase de tallage (figure 1a). Les teneurs en azote variaient entre 6% et 4% au stade 3 feuilles (450 °cj) alors qu'au stade 6 feuilles (1100°cj) les teneurs an azote variaient entre 4.3 et 1.9%. Après la phase de tallage les teneurs en azote des différents traitements étaient relativement stables autour de 3 %. En comparant les teneurs en azote par rapport à la courbe critique de Justes *et al.* (1995) (figure 1b) nous notons que certains traitements avaient des teneurs en azote supérieures aux valeurs critiques pendant toute la période du cycle. Pour d'autres traitements, les teneurs en azote variaient autour des

valeurs critiques alors que pour certains autres traitements les teneurs en azote étaient largement inférieures aux valeurs de Justes *et al.* (1995). Néanmoins, pour ses derniers traitements les teneurs en azote étaient similaires aux valeurs critiques après le stade 6 feuilles, suite à l'apport extra azoté appliqué au stade 6 feuilles. Des INN moyens entre 3 et 6 feuilles (épi 1cm) ont été calculés pour les différents traitements afin de caractériser l'état azoté moyen des plantes pendant la phase de tallage.

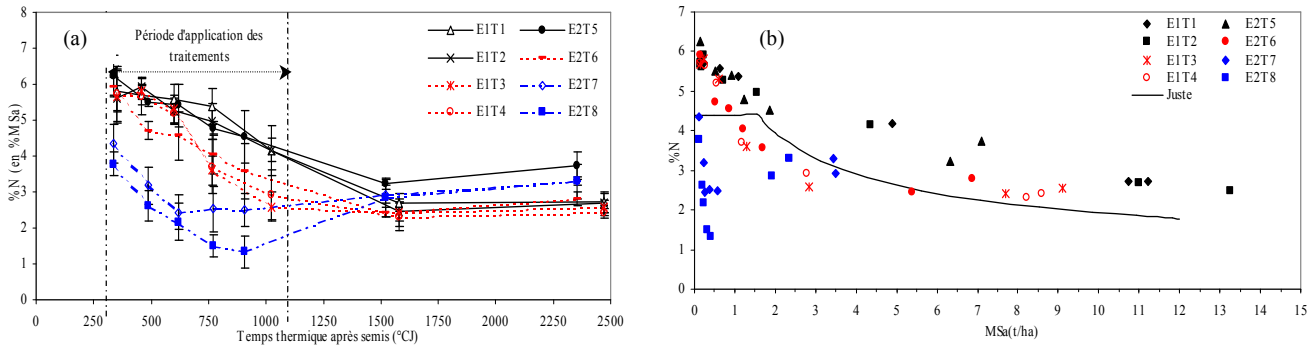


Figure 1 : Evolution des teneurs en azote des feuilles des différents traitements azotés appliqués (a) en fonction du temps thermique calculé à partir de la levée et (b) en fonction de la matière sèche produite.

Les effets des carences azotées précoces ont été caractérisés par l'étude de la relation entre l'indice de nutrition azotée moyen (3-6 feuilles) et la biomasse aérienne relative produite au stade fin tallage (figure 2a). Cette relation montre que toute réduction de l'INN entraîne une réduction de la biomasse aérienne relative produite en fin de tallage. La figure (2b) montre que les biomasses obtenues au stade 6 feuilles sont étroitement corrélées aux biomasses mesurées à la récolte et ce malgré l'état azoté non limitant obtenue pour tous les traitements entre le stade fin tallage et récolte. On en déduit de ses deux figures la forte dépendance entre la matière sèche à la récolte et l'INN moyen calculé pendant la phase de tallage. D'autres relations entre L'INN moyen et les composantes du rendement (Nombre d'épillet par épi, nombre de talle par plante, nombre de grain par épi) ont été aussi obtenues pour ses essais.

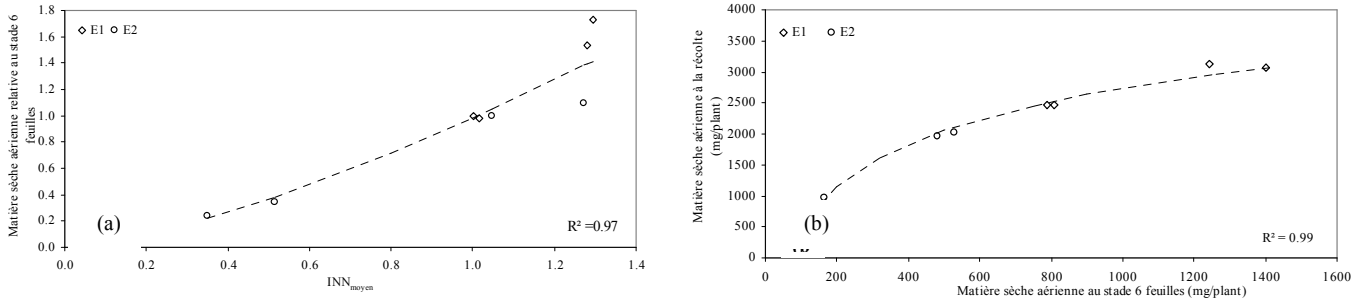


Figure 2 : (a) relation entre l'Indice de nutrition azoté moyen (INNmoyen calculé entre le stade 3 feuille et 6 feuille) et la matière sèche aérienne relative au stade 6 feuilles (biomasse traitement/biomasse du traitement avec INN=1). (b) relation entre matière sèche aérienne à la récolte en fonction de la matière sèche aérienne au stade 6 feuilles.

Afin de vérifier la possibilité d'utilisation du chlorophyllomètre HNT comme indicateur de l'état azoté des plantes pendant les stades précoces du blé ; des relations entre les valeurs HNT et les teneurs en azote ont été établies pour les stades repères (3 feuilles, 6 feuilles et mi-montaison). Les valeurs HNT (figure 3a) étaient corrélées aux teneurs en azotes. Cependant, pour chaque stade une droite d'ajustement différente a été obtenue. De même, des

relations différentes entre stades ont été obtenues entre les valeurs HNT et les teneurs en chlorophylle des feuilles.

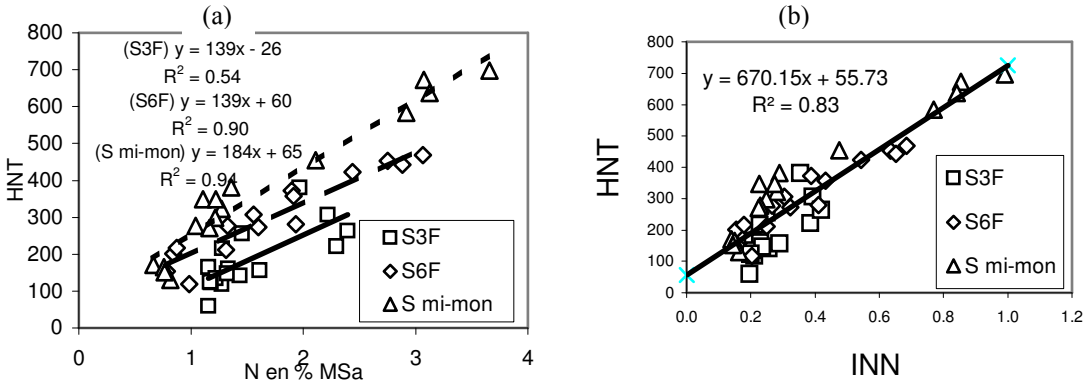


Figure 3 : relation entre les valeurs chlorophyllométriques (HNT) et (a) les teneurs en azote des parties aériennes (b) les indices de nutrition azotée et ce pour les différents stades repères : début tallage (S3 feuilles), fin tallage (S6 feuilles) et mi-montaison (2noeuds).

En représentant la relation entre les valeurs HNT et l'indice de nutrition azotée (figure 3b) une relation unique a été ajustée pour l'ensemble des données des trois stades de développement avec un coefficient de détermination élevée de 0.83.

Conclusion :

Les carences azotées précoces pendant la phase de tallage peuvent avoir des conséquences importantes à travers la réduction de la biomasse et du nombre d'épillets produits au stade fin tallage. Ses effets sont irréversibles même dans le cas où l'état azoté des plantes redeviendrait non limitant pendant le reste du cycle.

La corrélation obtenue entre les valeurs HNT du chlorophyllomètre et l'INN pour les stades précoces du blé dur ouvre la perspective d'utilisation de cet instrument comme outil d'aide à la décision.

Références bibliographiques :

Denuit J.P., M. Olivier, M.J. Goffaux, J.L Herman, J.P. Goffart, J.P. Destain, M. Frankinet (2002). Management of nitrogen fertilization of winter wheat and potato crops using the chlorophyll meter for crop nitrogen status assessment. Agronomie ***22***, p: 847-853.

Jeuffroy M.H. and Bouchard C ; (1999). Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. Crop Science, ***39***, 1385-1393.

Justes E., B. Mary, J.M. Meynard (1995). Evaluation of a nitrate test indicator to improve the nitrogen fertilization of winter wheat crops. In Proceeding of the international workshop diagnostic procedures for crop N management. Poitiers 82.p 100-101.

Latiri K., S. Nortcliff, D.W. Lawlor (1998). Nitrogen fertilizer can increase dry matter, grain production and radiation and water use water efficiencies for durum wheat under semi-arid conditions. European Journal of Agronomy. **9**, p: 21-34

Utilisation de STICS dans le projet CEAPC[1] sur le couplage des fonctionnements hydrique et azoté des peuplements cultivés

Nadine Brisson*, Jean Louis Durand, Florian Célette*****

**INRA, Unité CSE, Avignon*
***INRA, Unité EPF, Lusignan*
**** UMR System, Montpellier*

Le cadre et les objectifs du projet sont présentés dans le poster Durand et al., qui met en évidence la trame de cette étude pluridisciplinaire construite autour des interactions entre modélisation et expérimentation. Dans le projet, STICS a deux missions. La première, qui fait l'objet de cette présentation (voir aussi Durand et al., 2005) , consiste à générer des variables d'état écophysiologiques, simples ou synthétiques, pour les couverts modèles du projet et les analyser eu égard aux spécificités des espèces en présence et des milieux dans lesquelles elles évoluent. La seconde mission, en cours de réalisation, consiste à utiliser le modèle pour tester des hypothèses de fonctionnement mises en évidence par les expérimentations ou pour hiérarchiser le poids des différents facteurs acteurs dans les interactions eau x azote.

Protocole des simulations

Il a pris appui sur les systèmes de culture modèles du projet avec l'idée de réaliser des analyses comparatives sur un élément supposé agir sur les interactions eau azote. De façon plus explicite les systèmes et comparaison choisis sont les suivants :

- Système de cultures annuelles, comparaison d'espèces : maïs pluvial et sorgho pluvial à Lusignan
- Système de cultures annuelles, comparaison de confort hydrique : maïs irrigué et maïs pluvial à Lusignan
- Système de cultures pérennes herbacées, comparaison de potentiel d'enracinement : fétuque à enracinement à 70 cm et 150 cm à Lusignan. L'objectif est de simuler un obstacle à l'enracinement.
- Système de cultures pérennes ligneuses, comparaison de situation de compétition : vigne enherbée avec un couvert de graminées à enracinement très superficiel et vigne non-enherbée à Montpellier.

Le sol de Lusignan est un sol rouge à châtaigner et le sol de Montpellier est un sol profond bien pourvu en matière organique (assez peu représentatif des sols viticoles traditionnels). Les séries climatiques ont été considérées sur 10 ans (1994-2003).

[1] Projet CE-APC du programme national ECCO : Analyse hiérarchisée et mise en équations des processus physiques et biologiques impliqués dans le couplage des fonctionnements hydrique et azoté des peuplements cultivés

Résultats

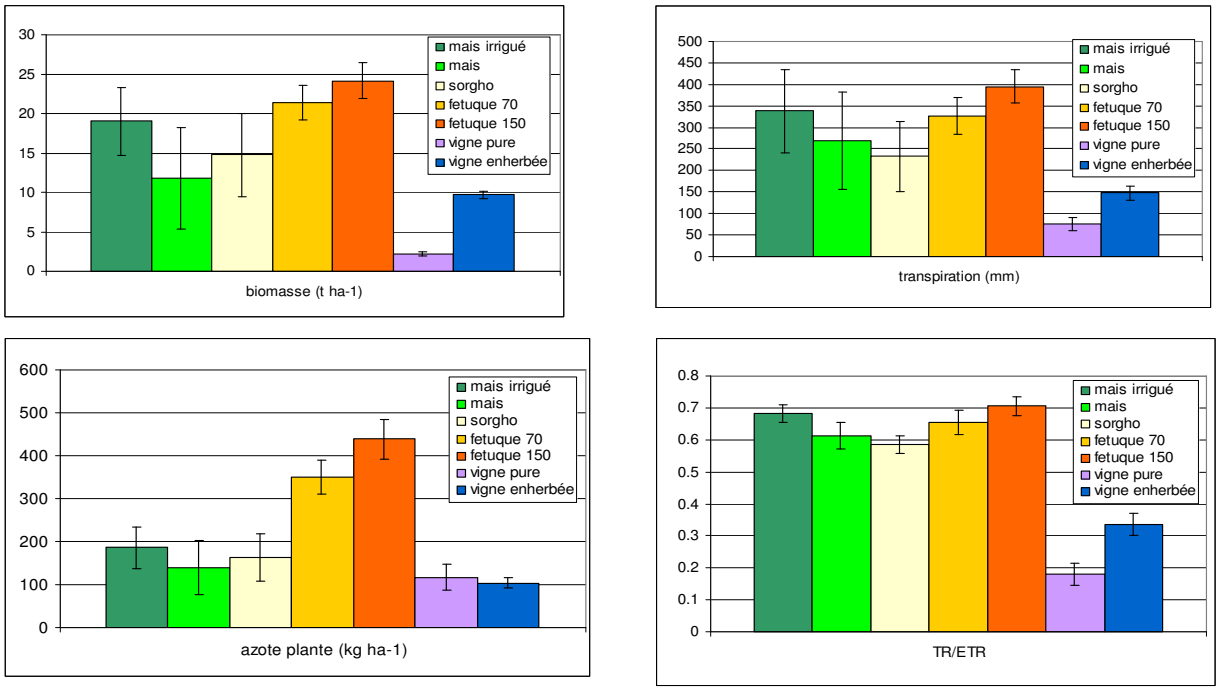


Figure 1 : Représentation du fonctionnement des divers couverts végétaux par des variables intégrées sur l'ensemble du cycle : a) la biomasse, b) l'accumulation d'azote dans la plante, c) la transpiration et d) la part de la transpiration dans l'évapotranspiration. Pour la vigne enherbée, les chiffres correspondent à des cumuls pour les 2 espèces

La figure 1 montre combien les couverts choisis sont différents et permettent d'échantillonner une large gamme de comportements. En ce qui concerne les cultures annuelles, le maïs se montre sensible à la sécheresse et gourmand en eau quand il en a à sa disposition ; le sorgho semble plus économe. Les faibles niveaux azotés par rapport aux graminées fourragères sont liés à la physiologie « C4 » de ces plantes. En ce qui concerne les graminées, la différence d'enracinement engendre des différences beaucoup plus significatives sur l'accumulation d'azote que sur les autres variables. Le comportement de la vigne pure en ce qui concerne l'accumulation d'azote est étonnant, semblant représenter une mise en réserve de l'azote exacerbée, supérieure au cumul des deux espèces dans le scénario vigne enherbée.

Les variables synthétiques que nous souhaitons tester dans le cadre du projet ont été calculées. Il s'agit de l'efficience de l'eau pour la biomasse (rapport biomasse/transpiration) et de l'efficience de l' eau pour l'accumulation d'azote (rapport azote plante/transpiration).

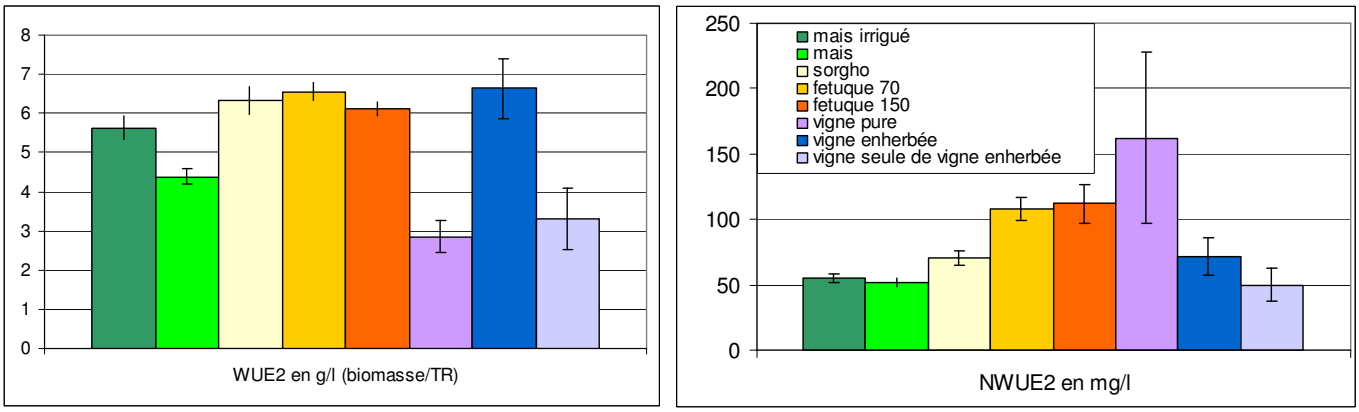
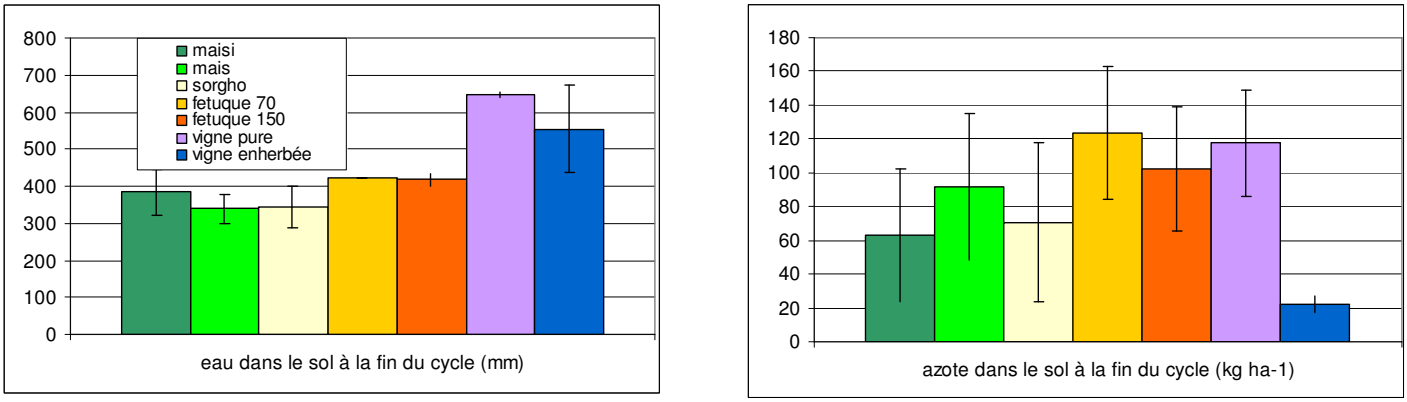


Figure 2 : Variables synthétiques a) efficience carbonée de la transpiration et b) efficience azotée de la transpiration

En dehors du comportement étrange de la vigne, la variable NWUE semble plus stable au sein d'une même espèce que la variable WUE, plus sensible aux conditions techniques et pédologiques. Toutefois la variable WUE pour la vigne est similaire en pure et en association avec un couvert de graminées. Le sorgho est plus efficace au regard de ces deux variables que le maïs : résultat conforme aux données expérimentales (travaux de Lemaire).

Si la composante racinaire du fonctionnement de la plante joue un rôle indéniable sur les variables élémentaires (mis en évidence par les simulations de graminées fourragères), ce rôle n'apparaît pas clairement sur les variables synthétiques. En revanche, les différences combinées de fonctionnement racinaire et aérien (mises en évidence par les simulations des cultures



annuelles) engendrent des différences significatives des variables de synthèse.
Figure 3 : Etat du sol à la fin des cycles de culture a) réserve totale en eau (mm) et b) réserve en azote minéral (kg/ha) sur 120 cm de profondeur.

Si on regarde l'état du sol en fin de cultures (qui correspond à l'automne pour les annuelles et à fin décembre pour les pérennes), on s'aperçoit que l'état hydrique est plus stable que l'état azoté (attention les cultures annuelles et fourragères sont sur le même sol alors que la vigne est sur un sol différent). L'état azoté du sol semble être le reflet des capacités d'absorption des cultures, sauf pour la vigne enherbée : le poids du lessivage pendant la culture doit être attentivement analysé.
d'interaction eau x azote dans la plante

Conclusion

Cette étude d'expérimentation numérique met en évidence le comportement différentiel des espèces. Elle permet d'analyser l'origine des interactions eau x azote : sol ou plante, adéquation entre croissances aériennes et racinaires. Elle met également en évidence certains dysfonctionnements du modèle qu'il sera nécessaire de corriger comme par exemple l'absorption d'azote de la vigne (cf intervention orale de G. Lemaire). Elle offre un cadre de réflexion pour la suite du projet avec des questions sur l'estimation du l'azote minéral provenant du turn-over racinaire des prairies de graminées ou sur la représentation des interactions eau x azote dans la plante s'appuyant sur le principe du facteur limitant.

Durand et al., 2005. Rapport d'avancement du projet ECCO-CEAPC

Couplage de l'eau et de l'azote dans les peuplements cultivés

Jean-Louis Durand[1*], Christian Gary[2], Thierry Bariac[3], Claude Doussan[4], Catherine Picon-Cochard[5], Victoria Gonzalez Dugo[1], Florian Célette[2], Michel Vauclin[6]

[1]*UEPF INRA 86 600 Lusignan,*
[2]*UMR System, 2 Place Viala 34 060 Montpellier Cedex 1,*
[3]*UMR BIOMCO, INRA – INAPG Bâtiment EGER, 78850 Thiverval-Grignon,*
[4]*CSE INRA Domaine Saint Paul 84914 Avignon cedex 9,*
[5]*FGEP INRA site de Crouelle 63039 Clermont Ferrand Cedex 2*
[6]*LTHE 38041 Grenoble Cedex 09*
[*]*Corresponding author email*: jldurandd@lusignan.inra.fr

Introduction

Dans le cadre du programme ECCO (PNBC) un certain nombre d'équipes se sont réunies sur la question du couplage de l'eau et de l'azote dans les cultures. Le texte suivant décrit la démarche et l'illustre à l'aide de quelques exemples de résultats obtenus au cours des deux premières années.

Descriptif du projet

Nous cherchons à comprendre l'influence du fonctionnement hydrique de la culture pendant plusieurs cycles sur différentes composantes du fonctionnement azoté : extraction de l'azote minéral du sol, influence sur le fonctionnement trophique et morphogénétique du peuplement cultivé. Il faut pour cela intégrer les conséquences des états hydrique et minéral du sol et des plantes sur la dynamique de la structure du peuplement. Différents processus seront plus particulièrement abordés à l'échelle de l'heure, du jour et du cycle:

Transport de l'azote minéral de la matrice du sol vers les surfaces racinaires.

Effets directs de l'humidité du sol et de l'état hydrique de la plante sur l'absorption de l'azote.

Contribution du réservoir racinaire à la satisfaction des besoins en azote des parties aériennes par recyclage d'azote depuis les tissus sénescents.

Impact des modifications de la répartition du carbone entre parties aériennes et racines sur la croissance des racines et l'exploration du sol.

L'objectif du projet est d'établir le poids respectif de ces différents processus dans l'action de la contrainte hydrique sur l'état de nutrition azotée à la fois en termes quantitatif et de temps de réponse. Nous confronterons en particulier cette hiérarchisation aux situations dans lesquelles une compétition entre les plantes du peuplement pour l'eau et l'azote peut s'installer. Afin de hiérarchiser ces processus nous proposons d'étudier plusieurs systèmes de culture: prairie, céréales et vigne enherbée. L'état de nutrition azoté et l'absorption d'azote dépendant de l'alimentation hydrique, nous proposons d'étudier ces processus sous différents niveaux de contrainte hydrique et azotée à différents stades de croissance.

Ce projet s'appuiera sur différentes expérimentations en conditions contrôlées et en plein champ (expériences de split-root sur solution nutritive, analyse de signatures isotopiques, architecture racinaire, propriétés hydrodynamiques du sol…) et sur la modélisation de la culture d'une part des flux d'eau et d'azote minéral dans le sol d'autre part. La modélisation de la culture aura pour fonction de simuler certaines variables d'état (celles issues de modules éprouvés) nécessaires à la compréhension des mécanismes et d'intégrer de nouvelles équations pour généraliser les résultats. La simulation mécaniste des transferts de masse dans le sol permettra de préciser le lien entre l'extraction d'eau et l'absorption d'azote par la végétation.

Deux sites expérimentaux porteront les projets au champ: l'ORE PCBB à Lusignan pour ce qui concerne les prairies et les céréales d'une part, le domaine du Chapître de l'INRA de Montpellier pour ce qui est de la vigne enherbée.

Résultats intermédiaires.

Analyse des processus

En conditions contrôlées : L'effet de l'état hydrique de la plante ou de la solution minérale du sol sur l'absorption d'azote et l'état de nutrition azotée de la plante ont été analysés en conditions contrôlées sur trois expèces de graminées fourragères très courantes (Festuca arundinacea, Lolium multiflorum et Dactylis glomerata). Il a été ainsi démontré pour la première fois que chez les deux premières, un effet des conditions hydriques sur l'INN peut être aussi fort que celui observé au champ. A noter que cet effet est indépendant d'un effet sur la photosynthèse. La troisième espèce est insensible. Il est remarquable que c'est aussi elle dont l'INN paraît le moins répondre au déficit hydrique au champ. Ces résultats indiquent que l'induction d'un déficit de nutrition azotée en conditions sèches pourrait provenir d'un autre mécanisme que du seul impact sur le transport de masse de nitrates ou tout autre mécanisme édaphique. La variabilité entre espèces est remarquable et ouvre des perspectives sur l'analyse des peuplements pluri-spécifiques. Un complément d'analyses du 13C permettra de préciser si les variations d'état de nutrition azotée sont liées à des variations d'efficience de l'eau au niveau de la plante.

Parallèlement une expérimentation sur maïs a été mise en place dans le réacteur RUBIC 3 à BiomCo avec des solutions nutritives plus ou moins enrichie en PEG et en système racinaire partagé. Comme au champ, la contribution du compartiment de plus faible Ψ (le plus enrichi en PEG) à la transpiration était d'autant plus importante que la transpiration était faible (Annexe 6). Cela contredit (Annexe 4) l'hypothèse d'une résistance hydraulique dans la plante constante au cours de l'expérience, ou bien cela indique un fort gradient de pression osmotique au voisinage de la racine (ce qui est également possible).

Au champ : Les variables nécessaires au calcul de flux d'azote minéral entre le sol et les racines ont été mesurées au champ en 2004 sur la vigne, sur la vigne enherbée avec de la fétuque (sur l'ensemble de la période de végétation, Annexe 1) et sur une prairie temporaire de fétuque élevée (au cours du cycle d'été Annexe 3).
Ces variables sont :

- la teneur en eau volumique du sol
- le potentiel hydrique dans le sol (pour des $\Psi > -0.08$ MPa)
- les propriétés hydrodynamiques des sols (Annexe 7).
- la teneur en azote minéral du sol à différentes périodes
- la profondeur et la densité d'enracinement (Cf. annexe 5). Grâce à une analyse utilisant la réflectance dans le proche infra rouge d'échantillons de racines prélevées sous prairie à deux constituants (Lm et fa) la répartition des racines a aussi pu être estimée.
- la teneur en azote des différentes parties de la plante, y compris des racines vivantes
- la croissance aérienne en biomasse
- l'indice foliaire
- l'état hydrique des plantes
- les indices indirects de nutrition azotée (SPAD sur la vigne et teneur en azote des feuilles supérieures chez les graminées).

Un certain nombre d'analyses restent attendues : isotopes 18 O et D, teneurs en azote plante et sol (minéral et organique) en particulier. L'ensemble de ces données doit permettre de discuter quantitativement un certain nombre d'hypothèses sur la hiérarchisation des phénomènes observés.

Modélisation et mise en relation des différents processus sur un cycle annuel

Elle a eu pour objet en 2004 de comparer un certain nombre de variables synthétiques de fonctionnement des différents peuplements cultivés étudiés dans le projet grâce au modèle STICS. Une étude sur les 10 dernières années climatique a été faite. Ces analyses sont présentées dans cette réunion (Brisson et al.).

Dans ce projet, STICS doit servir à tester les hypothèses sur les processus qui contribuent le plus au couplage entre flux d'eau et flux d'azote dans un champ. En retour, certains éléments expérimentaux nouveaux doivent remettre en question un certain nombre d'hypothèses et de formalismes actuellement utilisés dans STICS. Par exemple, la sensibilité de capacité d'absorption des racines à l'humidité du sol, ou bien la représentation de l'impact conjoint des coefficients de stress hydrique et azoté sur la croissance de l'indice foliaire.

Références bibliographiques.

Brisson N., Durand J.L. , Celette F. Utilisation de STICS dans le projet CEAPC[2] sur le couplage des fonctionnements hydrique et azoté des peuplements cultivés.

[2] Projet CE-APC du programme national ECCO : Analyse hiérarchisée et mise en équations des processus physiques et biologiques impliqués dans le couplage des fonctionnements hydrique et azoté des peuplements cultivés

Evaluation des modules eau et azote du sol de STICS dans les conditions du Sud de la France.

F. Fabre, M. Valé & E. Justes*
Avec l'appui technique de D. Chesneau
INRA, UMR ARCHE, BP 5262, F 31326 Castanet Tolosan Cedex
*auteur correspondant : justes@toulouse.inra.fr

Introduction.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les modules « sol » simulant les bilans hydrique et azoté du modèle STICS. Nous avons réalisé ce travail dans les conditions pédoclimatiques du Sud-Ouest de la France et choisi de travailler en situation de sol nu avec ou sans incorporation de résidus de récolte. Ce choix méthodologique permet notamment de d'affranchir d'éventuels artéfacts et interactions liés aux modules « plante ». Ainsi, l'analyse de la contribution de chaque processus aux bilans globaux d'eau et d'azote simulés par STICS est facilitée.

Matériels et méthodes.

En 2002 une expérimentation de plein champ a été mise en place à l'INRA de Toulouse (site d'Auzeville) avec douze parcelles issues d'un essai système de culture. Chaque parcelle a été conduite en sol nu et comprenait 2 traitements expérimentaux, avec et sans incorporation de résidus de diverses cultures (blé tendre, blé dur, sorgho, tournesol, soja). Des mesures mensuelles de profils hydriques et azotées ont été réalisées sur 90 cm durant une année. Au total, 294 points de mesures étaient disponibles.

Le programme de calcul LIXIM (Mary *et al.*, 1999) a été employé pour calculer le drainage, la lixiviation sous le profil de sol et l'évapotranspiration réelle du sol, en utilisant les mesures d'eau et d'azote minéral.

Ces résultats expérimentaux ont été confrontés aux simulations obtenues avec le modèle STICS. La démarche d'analyse mise en œuvre a consisté à :

1. confronter les dynamiques mesurées et simulées d'évolution des stocks d'eau et d'azote du sol ;
2. analyser les processus sous-jacents aux bilans hydrique et azoté, et plus particulièrement les flux de i) minéralisation de l'humus, ii) de décomposition des résidus de récolte incorporés, iii) d'évaporation du sol, iv) de drainage, et v) de lixiviation des ions nitrate.

Résultats & discussions.

Le tableau 1 rassemble les critères statistiques (voir Brisson *et al.*, 1998) permettant d'évaluer les performances du modèle sur des variables synthétiques représentatives du bilan hydrique et du bilan azoté du sol.

Tableau 1 : Critères statistiques d'évaluation des variables des modules bilan hydrique et bilan azotée de STICS en condition de sol nu.

	Bilan hydrique			Bilan azoté			
Critères [4]	RESMES[1] (mm)	Drainage (mm)	ETR (mm)	AZOMES[2] (kg N.ha^{-1})	Lixiviation (kg N.ha^{-1})	Minéralisation (kg N.ha^{-1})	JN[3] (jours)
MD (sim-obs)	-1	-50	55	17	-23	-4	7
RMD	0.01	-0.25	0.36	0.19	-0.30	-0.04	0.03
RMSE	12	64	69	49	33	36	37
RRMSE	0.05	0.32	0.45	0.53	0.43	0.39	0.16
EF	0.64	0.62	0.72	0.47	0.68	0.75	0.95
Pente / Ord [5]	0.73 / 67	0.72 / 6	1.26 / 15	0.95 / 22	0.73 / -3	0.93 / 3	1.05 / -5
R^2 [6]	0.73	0.94	0.91	0.50	0.93	0.75	0.95

[1] Stock d'eau du sol sur 90 cm, [2] Stock de N-NO3 du sol sur 90 cm, [3] Jour Normalisé, [4] MD : écart moyen, RMD : écart relatif moyen, RMSE : écart quadratique moyen, RRMSE : écart quadratique relatif moyen, EF : Efficience du modèle, [5] Pente et ordonnée à l'origine de la régression linéaire simple entre les valeurs observées et les valeurs simulées (n=294), [6] Coefficient de corrélation de la régression linéaire (5).

Bilan hydrique : Globalement, le bilan hydrique est assez mal simulé par STICS. Si, malgré un biais important, la dynamique du stock d'eau du sol (variable RESMES) est correctement estimée (MD = -1 mm), le modèle sous-estime le drainage (MD = -50 mm, Fig. 1) tandis qu'il surestime fortement l'évapotranspiration réelle (MD = 55 mm, Fig. 2). Donc, l'apparente bonne simulation de RESMES masque en réalité une compensation quasi-totale de la sur-estimation de l'ETR par une sous-estimation du drainage.

Une analyse de sensibilité succincte a montré que l'évapotranspiration réelle simulée est très sensible à 2 paramètres du sol : Q0 (seuil de transition entre évaporation réelle et évaporation potentielle) et CFES (lié à la répartition de l'évaporation au sein du profil de sol). Un travail d'optimisation des valeurs de ces paramètres dans nos conditions doit donc être réalisé. Ce résultat pose le problème de la détermination de Q0 et la question de la généricité du paramètre CFES.

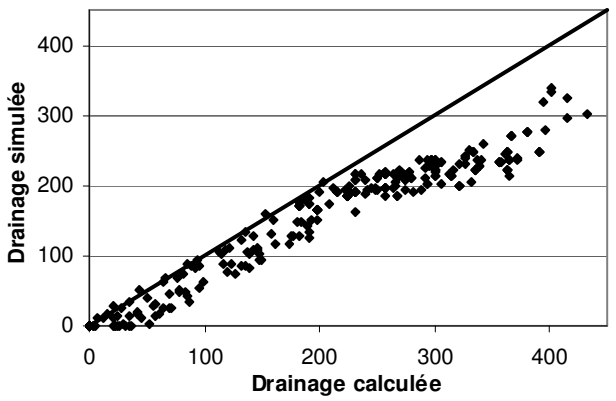


Figure 1 : Drainage simulée avec STICS en fonction du drainage calculée avec LIXIM.

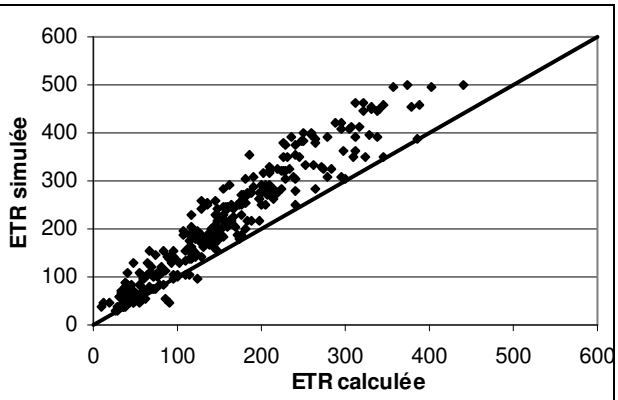


Figure 2 : ETR simulée avec STICS en fonction de l'ETR calculée avec LIXIM.

Bilan azoté : La simulation du bilan azoté semble globalement satisfaisante. Les jours normalisés (climat du sol) sont très correctement simulés (EF = 0.95). La simulation du stock en azote minéral du sol (AZOMES) est plutôt satisfaisante même si durant le dernier trimestre de la saison culturale, une surestimation systématique est observée dans toutes les situations. Globalement, la minéralisation nette est correctement simulée (RMD = -4 %), aussi bien dans les parcelles avec et sans résidus de culture incorporés (Fig. 3). Toutefois, ce résultat masque des biais assez forts dans la simulation de la minéralisation du sol. En effet, STICS sous-estime la minéralisation dans un premier temps et la surestime fortement durant les 3 derniers mois de l'expérimentation (période estivale) comme illustré pour l'analyse des résidus en fonction du temps (Fig. 4). Toutefois, le formalisme choisi pour représenter la minéralisation des résidus de cultures, ainsi que son paramétrage, semble adapté dans nos conditions (non illustré). Ce serait donc la dynamique de minéralisation de l'humus qui est en cause. Finalement, du fait de la sous estimation du drainage et de la minéralisation automnale et hivernale, la lixiviation est, en conséquence, elle aussi largement sous-estimée (RMD = -30 %).

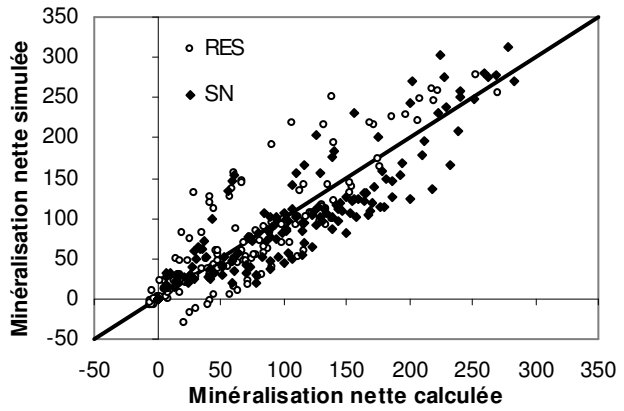


Figure 3 : Minéralisation nette simulée avec STICS en fonction de la minéralisation nette calculée avec LIXIM.

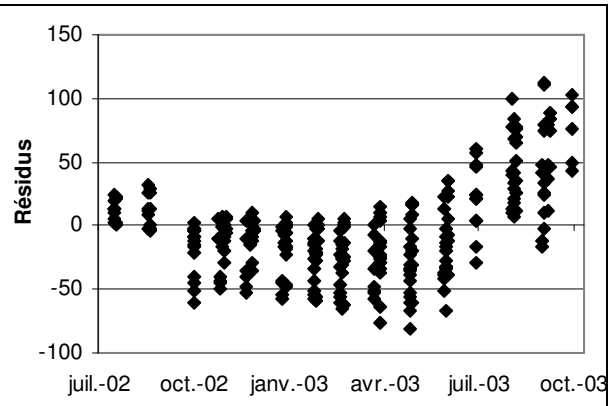


Figure 4 : Evolution des résidus (Simulée-Observée) de minéralisation nette en fonction du temps.

Conclusion

Globalement, le fonctionnement du sol dans le modèle STICS semble correctement modélisé. Toutefois, ce travail démontre la nécessité de mieux simuler :

1. l'évaporation du sol, notamment pour simuler correctement le drainage. Une procédure de détermination du paramètre Q0 doit donc être mise au point, avant de remettre en cause le formalisme et/ou le paramétrage de l'évaporation.
2. la dynamique de minéralisation en azote de l'humus du sol. Les travaux engagés par Matthieu Valé (Thèse en cours à Toulouse) devraient permettre d'avancer sur cette question.

Références bibliographiques

Brisson N., B. Mary, D. Ripoche, M-H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Dürr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Machet, J.M. Meynard & R. Delécolle (1998). *Agronomie*, 18, 311-346.

Mary B., N. Beaudouin, E. Justes & J. M. Machet (1999). *European Journal of Soil Science*, 50, 549-566.

Adaptation du module fixation de STICS

G. Corre-Hellou*, M.L. Faure, A. Dibet, N. Brisson, Y. Crozat

ESA, Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale et Agronomie, 55 rue Rabelais,49007 Angers Cedex7, France.
**g.hellou@groupe-esa.com*

Introduction

Le pois en tant que légumineuse, en complément à l'absorption d'azote minéral par les racines, possède la capacité à fixer l'azote atmosphérique grâce à une symbiose avec des bactéries du sol. Malgré l'existence de ces deux voies, la nutrition azotée est souvent un facteur limitant du rendement et la fixation symbiotique présente une grande variabilité entre situations agronomiques. La part d'azote provenant de la fixation symbiotique (% Ndfa) dépend de plusieurs facteurs environnementaux qui ont une action directe sur la fixation (majoritairement la quantité de nitrates mais aussi la température et l'humidité du sol). D'autre part, plusieurs auteurs ont montré que la quantité d'azote fixée était fortement dépendante de la quantité de photosynthétats disponibles (Voisin, 2002 ; Tricot, 1993).
Modéliser la fixation symbiotique en prenant en compte les effets directs du milieu ainsi que l'effet de la croissance permettrait de mieux prédire la nutrition azotée du pois ainsi que le bilan N de la culture dans des situations agronomiques variées. Le modèle STICS comprend un module fixation Ce module permet de calculer l'activité fixatrice en fonction d'une activité fixatrice potentielle-indépendante de la croissance- laquelle peut être réduite par les facteurs environnementaux à action directe (nitrates, eau, température, anoxie). Ces formalismes ont été initialement paramétrés pour le soja (Debaecke et al, 2001). L'objectif de ce travail est à partir de données expérimentales (i) de paramétrer pour le pois les formalismes existants et (ii) d'évaluer l'intérêt d'un lien entre l'activité fixatrice et la croissance afin de bien simuler la fixation dans des conditions limitantes de croissance, par exemple en situation de stress hydrique.

Matériels et méthodes

Le paramétrage a été réalisé à partir de données expérimentales issues d'essais de pois de printemps (variété Baccara à la densité de 80 pl m^{-2}) menés en plein champ à la station expérimentale de la FNAMS à Brain sur l'Authion (49), en 2002 sur un sol sableux et en 2003 sur un sol argilo-limoneux. Les essais ont été conduits en conditions hydriques non limitantes (irrigation pilotée par suivi de tensiomètres). En 2003, le pois a été cultivé avec ou sans un apport d'azote au semis (130 U). Des mesures hebdomadaires de croissance aérienne, de quantité d'N accumulée, de %Ndfa (méthode de l'abondance naturelle avec l'orge comme référence), de quantité d'N dans le sol ont été effectuées.
Les résultats d'un essai de pois baccara conduit en 2003 sans irrigation à la ferme expérimentale de Thorigné (49) ont été utilisés pour tester l'intérêt d'un lien entre la fixation et la croissance dans le cas d'une croissance limitée par un fort stress hydrique.

Résultats

1- Détermination des paramètres

Détermination de la fixation potentielle

Les données expérimentales ont permis de déterminer pour le pois les paramètres définissant l'évolution de fixation potentielle (Figure 1a). La fixation potentielle est calculée en fonction d'une fixation maximale (paramètre variétal) qui s'élève à 6,8 kg N ha^{-1} $jour^{-1}$. L'activité fixatrice démarre au stade DNO, atteint 105 degrés-jour après la levée et s'arrête au stade FNO, atteint 685 degrés-jour après le démarrage de la fixation. Puis il y a décroissance de la courbe potentielle jusqu'à la fin de l'activité fixatrice au stade FVINO (140 degrés-jour après le début de la baisse de la fixation). La vitesse de mise en place de la fixation potentielle s'élève à 0,0013 kg N fixé ha-^{1} degré $jour^{-1}$. Elle est représentée dans STICS par le paramètre vitno qui représente la vitesse d'installation de la fixation en proportion de fixmax soit 0.003 kg N fixé ha^{-1} degré-$jour^{-1}$. Ces paramètres sont globalement en accord avec les travaux réalisés sur la fixation symbiotique du pois par l'INRA de Dijon (Voisin, 2002).

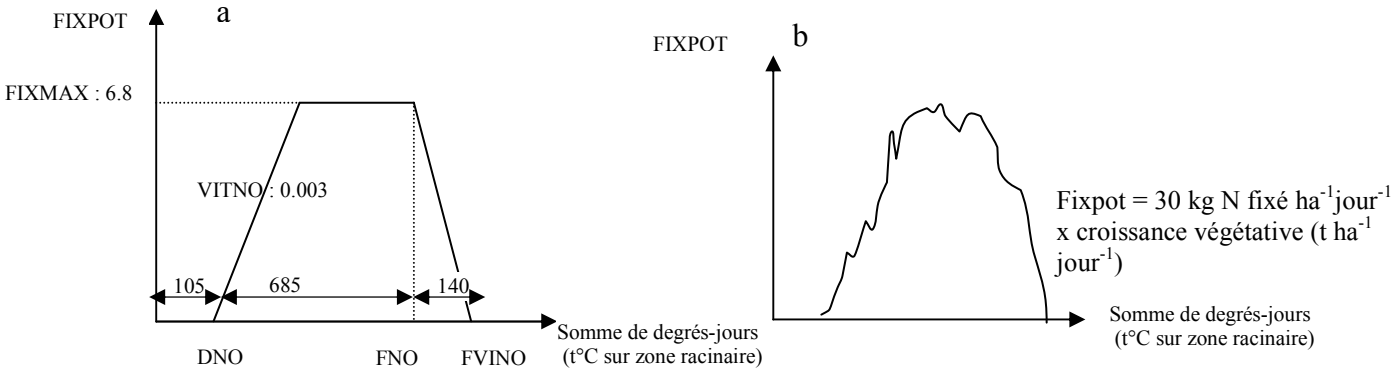


Figure 1 : Formalismes de la simulation de la fixation potentielle (Fixpot) suivant deux options : avec fixmax, vitno et des paramètres de développement (a) ou avec un lien direct avec la croissance (b)

Une relation entre la vitesse de croissance et la vitesse de fixation a été mise en évidence à partir des données expérimentales de 2002 (faible disponibilité en N minéral) : Fixpot (kg N fixé ha^{-1} $jour^{-1}$) = 30 kg N fixé t de MS^{-1} x croissance végétative (t MS ha^{-1} $jour^{-1}$) (R^2 = 0.9). Cette relation est en accord avec celle reportée par Jensen (1997). Elle a été introduite dans le module de fixation de STICS (Figure 1 b).

Ce nouveau formalisme simplifie le nombre de paramètres puisque les paramètres de développement et vitno ne sont plus utiles. La fixation potentielle peut alors être estimée directement par le niveau de croissance.

Prise en compte des facteurs limitants

L'activité fixatrice décroît linéairement avec la concentration en nitrates (Voisin, 2002). Dans STICS, cette relation fait intervenir deux seuils qui ont été déterminés à partir de nos données expérimentales : la concentration au dessus de laquelle la fixation est nulle (concrac0 = 2.7 kg ha^{-1} cm^{-1} de sol) et la concentration en dessous de laquelle la fixation est maximale (concrac100 = 0.004 kg ha^{-1} cm^{-1} de sol).

La limitation par le stress hydrique est estimée par le % de couches de sol dont la teneur en eau est inférieure à une humidité seuil que l'on a prise égale à l'humidité au point de flétrissement.

Les paramètres définissant la limitation de la fixation par l'anoxie ou la température n'ont pas été modifiés du paramétrage initial réalisé pour le soja.

La fixation réelle (fixréeel) est calculée à partir de la fixation potentielle (fixpot) et des facteurs limitants par l'équation suivante : Fixréel = fixpot x min (effet eau, effet N) x effet anoxie x effet température.

2- Simulations

Le paramétrage réalisé et l'introduction du formalisme reliant la fixation potentielle et la croissance permettent de simuler convenablement la quantité d'azote fixée et la quantité totale d'azote accumulée au cours du cycle. La figure 2 montre des résultats satisfaisants pour deux exemples correspondant à des situations pédoclimatiques et des disponibilités en N minéral au semis contrastées.

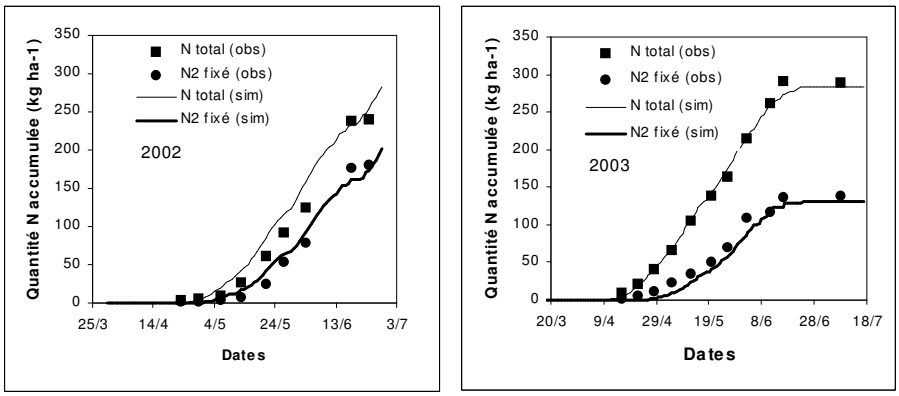


Figure 2 : Valeurs observées et simulées de la quantité d'N_2 fixée et la quantité d'N total accumulée pour 2 situations contrastées (2002 : sol sableux, 22 kg N ha^{-1} au semis et 2003 : sol argilo-sableux, 71 kg N ha^{-1} au semis + 130 N apporté au semis)

Pour des conditions de croissance non limitantes (cas de l'ensemble des traitements ayant servi au paramétrage), les deux options de calcul de la fixation (avec ou sans lien avec la croissance) aboutissent à des résultats similaires et satisfaisants. La prise en compte de l'évolution de la croissance est prise en compte dans la première option indirectement par le paramètre vitno et les paramètres de développement. Dans le cas d'un stress hydrique important limitant la croissance, la première option surestime la fixation car seul l'effet direct de l'humidité du sol sur la fixation est pris en compte. La deuxième option en prenant en compte la faible croissance améliore nettement la prévision de la quantité de N_2 fixée (Figure 3).

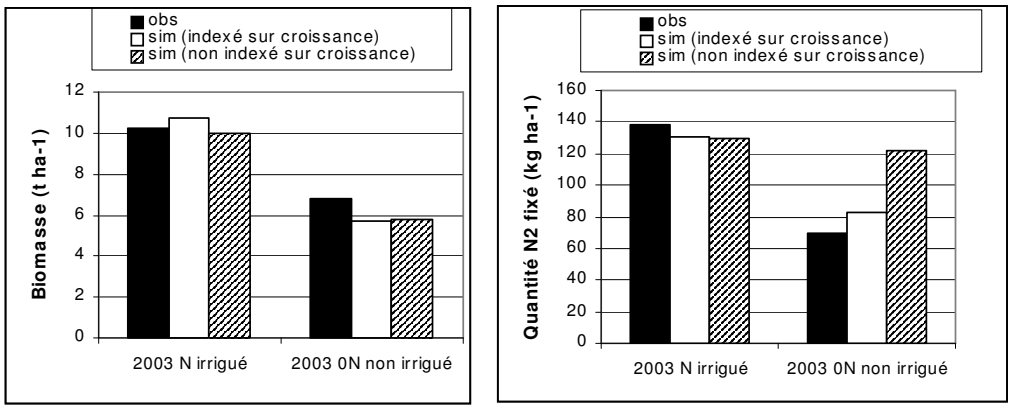


Figure 3 : Comparaison des deux options de simulation (avec ou sans lien avec la croissance) dans le cas d'absence de facteurs limitants la croissance et dans le cas d'un fort stress hydrique (situation non irriguée)

Conclusion

L'introduction d'un lien entre l'activité fixatrice potentielle et la croissance permet de mieux simuler la fixation dans des conditions de croissance limitée tout en simplifiant le formalisme initial. Ce paramétrage devra être testé à l'aide d'un plus grand jeu de données issues de situations agronomiques contrastées.

Ce travail fait partie du projet européen GRAINLEGUMES financé par l'Union Européenne dans le cadre du 6ème PCRD.

Références

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.

Jensen, E. 1997. The role of grain legume N2 fixation in the nitrogen cycling of temperate cropping system. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.

Tricot F 1993 Mise en place des nodosités du pois protéagineux de printemps (*Pisum sativum* L.). Influence de la nutrition carbonée. Université de Paris-Sud Orsay, France.

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, Université de Bourgogne, 113 p. + annexes

Paramétrage de Stics pour la moutarde blanche (*Sinapis alba* L.) par expérimentation.
Effet du statut azoté sur l'absorption d'énergie lumineuse, la croissance, la senescence des feuilles et l'absorption critique et maximale.

P. Thiébeau[1*], B. Mary[2], E. Justes[3]

[1] : *INRA Unité d'agronomie de Laon-Reims-Mons, BP 224, F-51686 Reims cedex 2*
[2] *: INRA Unité d'agronomie de Laon-Reims-Mons, BP 224, F-02007 Laon cedex*
[3] *: INRA UMR INRA/ENSAT Agrosystèmes Cultivés et Herbagers, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan cedex*
** Auteur correspondant : thiebeau@reims.inra.fr*

Introduction

L'introduction régulière de cultures intermédiaires dans les assolements modifie les bilans de C et N réalisés à l'aide de modèles de fonctionnement des systèmes de cultures tels que STICS (Brisson *et al*., 2003). Dans le cadre d'un programme de recherche pour évaluer, par modélisation, l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture (Dorsainvil, 2002), notre travail a eu pour objectifs d'évaluer l'absorption d'énergie lumineuse, la croissance et l'absorption d'azote de la moutarde blanche, utilisée comme culture intermédiaire, afin d'adapter le paramétrage de STICS à cette culture.

Matériels et Méthodes

Les expérimentations ont été conduites en 1999, en région Champagne-Ardenne (France). Le sol est une rendzine brune sur craie à poches de cryoturbation. Le dispositif expérimental comprend 3 blocs répétition (parcelles élémentaires de 96 m^2). La moutarde (cv. Twist, 12 $kg.ha^{-1}$) est semée après une céréale (paille exportée) au 15/08. Les traitements sont i) une moutarde témoin sans azote (N0); ii) 3 moutardes recevant respectivement 50, 100 et 150 kg $N.ha^{-1}$ (N50, N100, N150) où l'azote est supposé devoir être limitant à des stades différents de la croissance ; et iii) 2 moutardes recevant respectivement 200 et 250 kg $N.ha^{-1}$ (N200 et N250) où l'azote est supposé ne jamais être limitant au cours de la croissance. Les plantes sont conduites avec irrigation, de manière à ce que l'alimentation hydrique ne soit jamais un facteur limitant de la croissance, et que l'azote soit complètement disponible pour la plante. L'azote est apporté sous forme d'ammonitrate 33,5% , appliqué pour N150, N200 et N250 en 2 apports : 100 $kg.ha^{-1}$ au semis et le solde 1 mois plus tard (Thiébeau et Justes, 2004).
La mesure d'une cinétique de croissance par prélèvements réguliers de plantes (parties aériennes et racinaires, et suivi de la sénescence foliaire) permet : i) de suivre la dynamique de mise en place de l'indice foliaire (planimètre Li-Cor 3100, Eurosep Instruments) et de quantifier l'énergie absorbée (bilan radiatif réalisé à l'aide de capteurs de PAR Solems 400-750 nm) selon le protocole de Varlet-Grancher et Bonhomme (1974), ii) de mesurer l'accroissement de biomasse et sa teneur en azote total (méthode Dumas).
Le bilan radiatif permet de calculer l'ajustement des paramètres de l'efficience d'absorption de l'énergie lumineuse utile à la photosynthèse, qui suit une fonction de type Loi de Beer-

Lambert : εa_{max} $(1 - e^{-k.LAI})$, avec εa_{max} = coefficient d'absorption maximal de l'énergie lumineuse par une culture couvrant complètement le sol, et k = coefficient d'extinction du couvert.

Résultats

L'ajustement mathématique entre l'efficience d'absorption mesurée (ε_a) et l'indice foliaire mesuré permet de calculer une valeur d'absorption maximale de 95,5% de l'énergie lumineuse incidente, ce qui est proche de la valeur de 95% généralement admise pour d'autres cultures (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1974). Le coefficient k d'extinction (paramètre *extin* de STICS) s'établit à 0,70 (r^2 = 0,97 ; ddl = 25) (Figure 1) ; ce qui est élevé par rapport à ce que l'on rencontre sur graminée (0,57 pour la fétuque élevée), mais bas par rapport à une autre crucifère connue, le colza (0,84). Ce coefficient n'est, ici, jamais significativement affecté par le statut azoté de la moutarde ; ce qui n'est pas le cas des valeurs d'indice foliaire de chacun des traitements (Thiébeau, 2001 ; Thiébeau et Justes, 2004).

Figure 1 : Efficience d'absorption mesurée selon l'Indice Foliaire de la moutarde
Figure 2 : Azote absorbé par les différents traitements de la moutarde en fonction de la Matière Sèche Aérienne totale.

Le statut azoté de la moutarde a une incidence sur la Matière Sèche Aérienne totale élaborée (parties vertes et sénescentes) (Figure 2). Seuls les traitements N200 et N250 ont une cinétique de croissance similaire. On peut donc supposer que ces traitements n'ont pas été limitant dans leur alimentation azotée, ce qui permet de proposer un ajustement entre l'azote absorbé et la biomasse élaborée par ces traitements :

$$\text{Nabsorbé}_{max} = 81.\text{MSAt}^{0,65}$$

avec : r^2 = 0,99 , ddl = 19.

La mesure en dynamique de la perte des feuilles en cours de culture par la moutarde a permis de quantifier cette biomasse à 0,75 t/ha pour N0, et à 1,5 t/ha pour N100 et N250. La

restitution d'azote réalisée ainsi oscille entre 10 et 50 kg/ha respectivement pour N0 et N250. Cette restitution apparaît proportionnelle à la Matière Sèche Aérienne totale à un instant donné (Figure 3), et l'incidence du statut azoté n'apparaît pas significative.
Le suivi de la chute des feuilles permet du calculer la MSA générée par la moutarde en cours de culture (MSA verte + sénescente + feuilles mortes) qui, rapportée à la biomasse racinaire, permet de calculer l'efficience de répartition des assimilats (ε_p). Il en résulte un coefficient constant, quel que soit le statut azoté : 0,91 (±0,02) ; ce qui suggère que peu d'assimilats sont dirigés vers les racines de la moutarde.

Cette expérimentation nous permet également de calculer la courbe de dilution critique de la Moutarde, indispensable au paramétrage de STICS (figure 4). Elle s'établit comme suit :

$$Nc\ (\%) = 5{,}29.MSAt^{-0{,}06} \quad \text{pour } MSAt < 1{,}6\ t.ha^{-1} \qquad (1)$$

$$Nc\ (\%) = 6{,}05.MSAt^{-0{,}34} \quad \text{pour } 1{,}6 < MSAt < 8{,}0\ t.ha^{-1} \qquad (2)$$

Contrairement à ce qui est couramment admis pour d'autres espèces (blé, colza, maïs, etc.), au lieu d'une teneur critique en azote stable pour de faibles quantités de biomasse, cette courbe adopte une double fonction. Ce type d'ajustement est suggéré par Caloin et Yu (1982), mais est rarement mis en œuvre parce qu'en l'absence d'une concurrence pour la lumière entre plantes durant cette phase d'installation des cultures au champ, celles-ci expriment une variabilité spatiale qui peut être conséquente. Il faut alors augmenter le nombre et/ou la surface de prélèvements pour pallier ce défaut de précision, et parvenir à calculer cette première fonction. Les valeurs des coefficients de la courbe de dilution critique renseignés dans STICS sont celles de la seconde équation, avec *adil* = 6,05 et *bdil* = 0,34. Les paramètres concernant la courbe de dilution maximale qui ont été introduits sont pris en conservant le coefficient de dilution de la courbe critique, soit *bdilmax* = 0,34 et le coefficient *adilmax* a été fixé à 8,5 en admettant une absorption supplémentaire d'azote supérieure à 40% par rapport à la courbe critique, comme obtenu dans l'expérimentation (figure 2). Cette proportion est en bon accord de celle calculée par Colnenne *et al*. (1998) pour une autre crucifère comme le colza (38%).

Figure 3 : Quantité d'azote restitué au sol par les feuilles mortes de la moutarde en fonction de la matière sèche aérienne totale
Figure 4 : Courbe de dilution de l'azote critique de la moutarde. Comparaison avec celle d'autres cultures.

Conclusion

La capacité d'absorption d'azote par la moutarde est importante (N abs. $_{max.}$). Cette plante a besoin d'accumuler de très fortes quantités d'azote pour atteindre la concentration critique (N_c), ce qui indique que la moutarde est peu efficiente pour convertir l'azote absorbé en biomasse, et la rend intéressante pour une utilisation comme culture piège à nitrates ;
D'autres résultats issus de ce travail sont intégrés dans le modèle STICS-Moutarde. Ils concernent les paramètres de croissance racinaire (*Zrac, LRACZ*), feuillage (*dalaimaxbrut*, *durvieF, ratiodurvieI, abcission*), gel (*tletale, tdebgel*), etc.

References

Brisson *et al*., 2003. *Eur. J. Agron.*, 18, 309-322.
Caloin et Yu, 1982. *Anal. Bot*., 49, 599-607.
Colnenne *et al*., 1998. *Ann. Bot*., 81, 311-317.
Dorsainvil F., 2002. PhD Thesis, INA P-G, Paris, 124 p.
Thiébeau P., 2001. Master Thesis, ITIA, CNAM/INA P-G, 93 p.
Thiébeau et Justes, 2004. Book of Proc. VIII ESA Congress, Copenhague, *461-462*.
Varlet-Grancher et Bonhomme, 1974. *Ann. Agron.*, 25 (6), 811-819.

Le module résidus de STICS pour décrire la Mineralisation du C et N des matières organiques exogènes

B. Nicolardot [1], V. Parnaudeau [1], B. Mary [2]

[1] *INRA, Unité d'agronomie LRM, 2 esplanade R. Garros, BP 224, 51686 Reims cedex 2*
[2] *INRA, Unité d'agronomie LRM, rue Fernand Christ, 02007 Laon cedex, mary@laon.inra.fr*

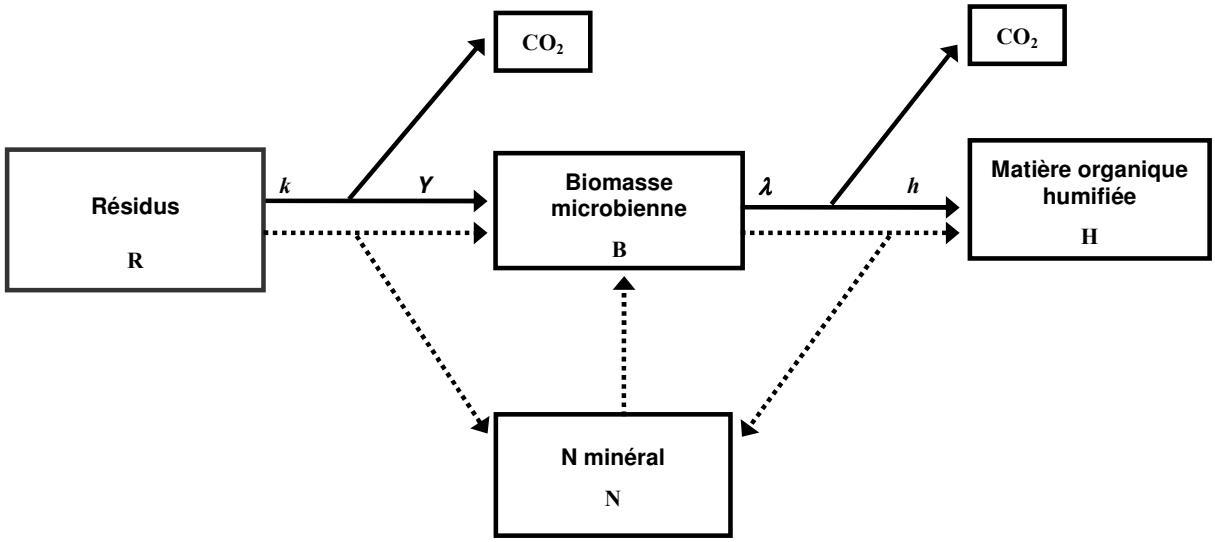
Introduction

prévoir le devenir du carbone organique de ces produits à plus long terme. Une des principales sources de variabilité de la valeur azotée et du stockage de carbone dans le sol est la minéralisation de la matière organique de ces produits. Le modèle STICS est constitué de plusieurs modules dont l'un décrit la décomposition des matières organiques apportées au sol et les flux de carbone et d'azote associés.

Description du module de décomposition des matières organiques exogènes

Le modèle simule l'évolution de 3 compartiments organiques (Figure 1) : les résidus organiques, la biomasse microbienne et la matière organique humifiée (Nicolardot et al., 2001). Chaque compartiment est affecté d'un rapport C/N (connu pour le résidu et pour la matière organique humifiée et variable pour la biomasse microbienne). La décomposition de ces compartiments obéit à une cinétique d'ordre 1 en utilisant les paramètres présentés dans le tableau 1, ce qui détermine les flux de carbone et d'azote (Figure 2). La valeur de certains paramètres de décomposition dépend du rapport C/N du résidu. Les constantes de vitesse dépendent des conditions de température, d'humidité et de disponibilité en azote minéral.

Figure 1 : Schéma du module de décomposition des résidus de STICS



Paramétrage actuel du module

Le paramétrage a surtout été effectué à partir de résultats d'incubation en conditions contrôlées où sont mesurées les cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote. Dans la version actuelle du modèle, le paramétrage a été effectué pour les résidus de récolte à maturité (Bentz, 1998; Hdadi, 2000) (Tableau 1) et pour les cultures intermédiaires (Malgowski, 2000; Justes et Mary, 2004). Le paramétrage pour ces 2 types de résidus végétaux peut être considéré comme relativement robuste (Figure 3). Un paramétrage a été également proposé quelques autres produits organiques (Tableau 2). Les jeux de données utilisés pour ce

paramétrage n'ont pas été aussi importants que ceux utilisés pour les résidus végétaux. De plus, les études récentes effectuées pour les boues de station d'épuration et les lisiers montrent que le formalisme actuel est insuffisant pour bien décrire l'évolution du carbone et de l'azote (Péan, 2003). Les simulations sont nettement améliorées si l'on considère que ces produits organiques ayant déjà subi une évolution biochimique sont constitués de 2 fractions : une fraction décomposable et une fraction plus stable dont la vitesse de décomposition est identique à celle de la matière organique humifiée du sol. La fraction stable du résidu vient alimenter directement le compartiment de matière organique humifiée en absence de toute biotransformation ultérieure.

Tableau 1. Paramètres du modèle avec les résidus de récolte

Rapport C:N des résidus (mesuré ou simulé)	R
Rapport C:N de la matière organique humifiée	$R_h = 9.5$
Rapport C:N de la biomasse microbienne zymogène	$R_b = 16.1 - 123 / R$
Taux de décomposition de la fraction décomposable du résidu (njour^{-1})[1]	$k = 0.07 + 1.94 / R$
Taux de décomposition de la biomasse microbienne (njour^{-1})[1]	$\lambda = 0.0110$
Taux d'assimilation du carbone du résidu par la biomasse microbienne	$Y = 0.62$
Taux d'humification de la biomasse microbienne	$h = 1 - 0.69\ R / (11.2 + R)$

[1] njour = "jour normalisé" = jour à 15°C et teneur optimale en eau

Perspectives

Le travail actuellement poursuivi sur le module résidu de STICS consiste à :

- Elargir la gamme de produits actuellement simulés, en prenant en compte un plus grand nombre de produits (lisiers, composts, guano …) et les typologies réalisées par certaines équipes (EGC Grignon, USARQ Quimper, Agronomie LMR Reims) pour les composts urbains, les boues de station d'épuration, les effluents issus d'élevage et les effluents agro-industriels ;
- Prendre en compte 2 fractions de dynamique différente dans les produits évolués et tester l'intérêt de ce nouveau formalisme ;
- Evaluer la valeur prédictive du modèle à long terme, c'est-à-dire sa capacité à prévoir la valeur humique des produits organiques (k_1 du modèle Hénin-Dupuis) en simulant les cinétiques de minéralisation du C organique au cours d'incubation de longue durée.

Ce travail sera réalisé dans le cadre d'une étude financée par l'ADEME qui vise à proposer un nouvel indice de stabilité des matières organiques, dans le cadre de la normalisation AFNOR, pour caractériser les amendements organiques. Il sera effectué en constituant une base de données réunissant les résultats de cinétiques de minéralisation du C et N et les caractéristiques biochimiques de produits organiques obtenues par divers laboratoires (INRA et privés).

Références

Bentz B. (1998) *DEA, option Agronomie, INA-PG*, 25 pp.
Hdadi K. (2000) *DEA Fonctionnement de la biosphère continentale, PARIS 6- INA-PG,* 31 pp.
Justes E., Mary B. (2004) In *Controlling nitrogen flows and losses*, WAP, 122-130.
Malgowski C. (2000) *Mémoire de fin d'étude ESITPA,* 43 pp.
Nicolardot B., Recous S., Mary B. (2001) *Plant and Soil,* 228, 83-103.

Péan L. (2003) *Maîtrise Institut des Mathématiques Appliquées, Angers*, 36 pp.

Tableau 2 : Résidus organiques actuellement pris en compte dans la version actuelle de STICS.

Nature des résidus	Effectif de paramétrage	Commentaires
Résidus de récolte	27	Validation avec 21 résidus au laboratoire
Résidus de CIPAN	16	Validation avec 13 résidus au champ
Fumiers	6	Produits hétérogènes → typologie nécessaire
Compost d'ordures ménagères	3	Produits hétérogènes → typologie nécessaire
Boues de station d'épuration	17	Produits hétérogènes → typologie nécessaire
Vinasses de distillerie	2	Effectif insuffisant
Corne broyée	1	Effectif insuffisant

Figure 2 : Exemple de la simulation par le module résidu de STICS de la décomposition d'une boue de station d'épuration (rapport C/N=7.3).

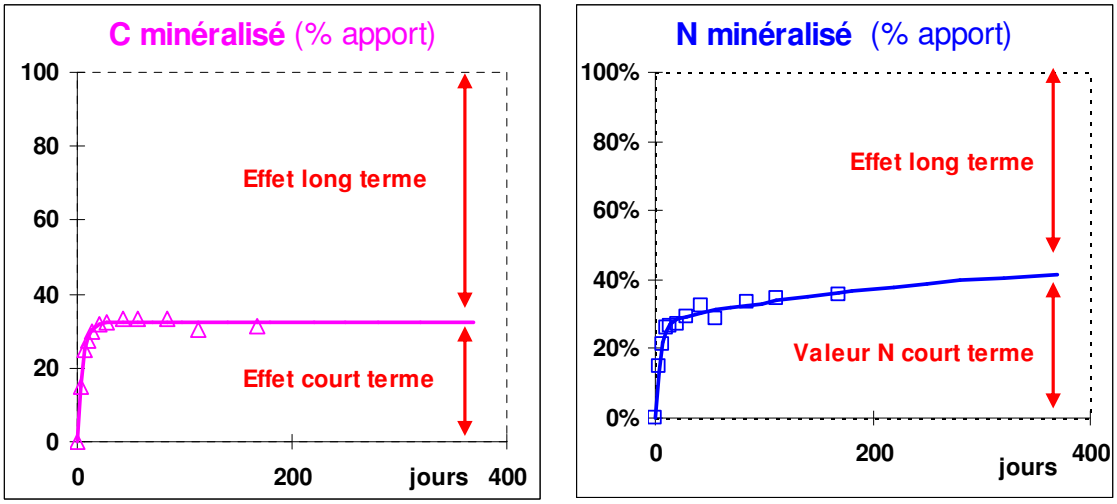
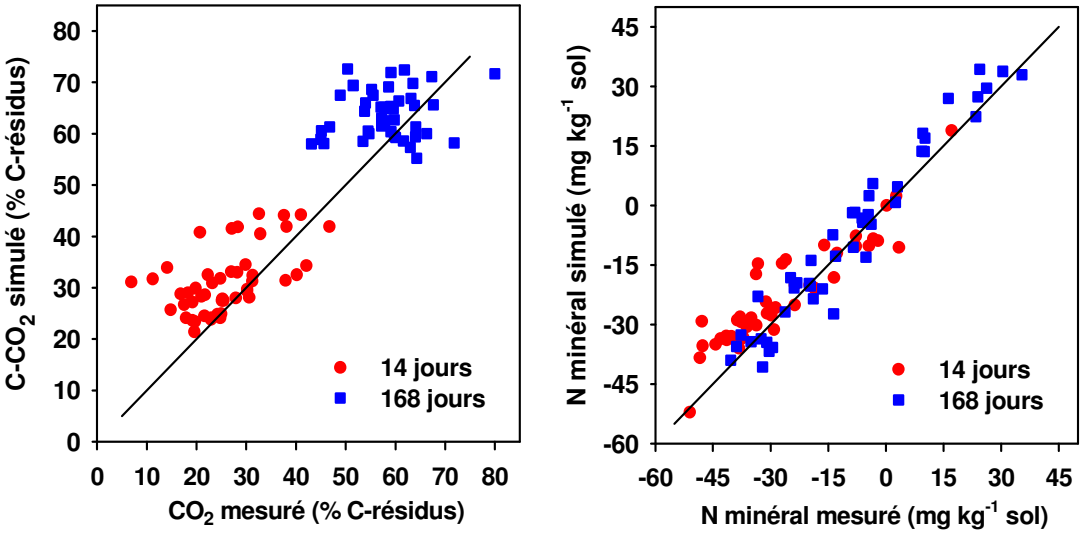


Figure 3 : Données simulées par le module STICS vs. données expérimentales à 14 et 168 jours d'incubation pour le jeu de données des 48 résidus de culture à maturité.



2. Aide pour une bonne utilisation du modèle et paramétrage

Animateur table ronde : M. Launay

Adaptation du modèle à de nouvelles cultures, assimilation de données mesurées in situ ou par télédétection, bases de données et de paramètres, environnement du modèle,…

Généricité et méthodologie d'adaptation de STICS a de nouvelles cultures.

M. Launay*, F. Flenet, F. Ruget, I. Garcia
INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
**Corresponding author email:* mlaunay@avignon.inra.fr

Introduction

Depuis sa création en 1996, le modèle STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) a été adapté à 24 cultures, parmi lesquelles des cultures industrielles, des cultures maraîchères et des cultures pérennes, herbacées et ligneuses (Brisson et al., 2003). Durant le séminaire STICS de janvier 2003, et à l'initiative de Francis Flénet, certains participants ont souhaité mettre en commun leurs expériences d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures, pour élaborer une méthode à l'usage des futurs utilisateurs-adaptateurs. Par « nouvelle culture » on désigne soit une espèce dont le paramétrage pour STICS n'existe pas, soit une espèce déjà paramétrée mais pour une autre utilisation (par exemple, le lin graine au lieu du lin fibre). Cette présentation a pour objet d'exposer cette méthode et s'appuie entièrement sur la notice que ce groupe est actuellement en train de rédiger.

I. Fondement de la méthode : modularité et généricité de STICS

Le modèle STICS est modulaire et générique. Cette double caractéristique est la clef de voûte de la méthode d'adaptation proposée. STICS est organisé en **modules**, chaque module gérant la simulation d'un groupe de processus écophysiologiques ou physiques particuliers. Ces modules échangent des informations et des variables entre eux (Figure 1). Le modèle est **générique**, c'est-à-dire qu'il est capable de simuler le développement et la croissance de différentes cultures. Il possède pour différents processus des options de formalismes qui peuvent être activées par l'utilisateur afin de représenter au mieux l'écophysiologie d'une espèce et son mode de culture. Par ailleurs, les paramètres spécifiques intervenant dans les équations de ces formalismes sont externes (ils sont contenus dans le fichier d'entrée *.plt) et peuvent donc être modifiés aisément.

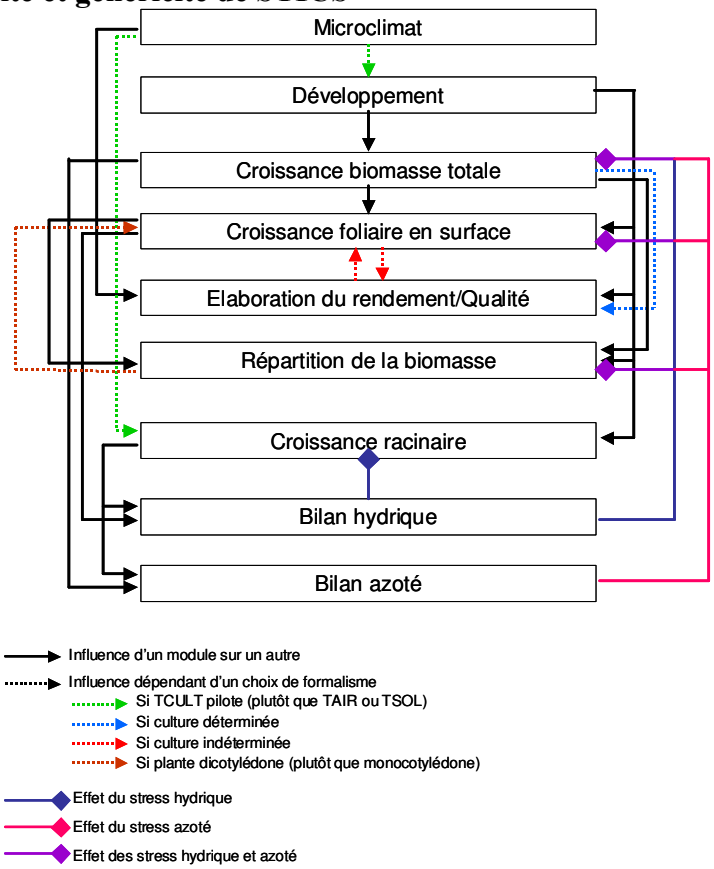


Figure 1. Les modules de STICS et leurs influences respectives.

II. La méthode et ses étapes.

La première étape consiste à choisir parmi les options de formalismes possibles celles qui représenteront au mieux l'écophysiologie de la plante et son contexte cultural. La seconde étape consiste à déterminer les valeurs des paramètres spécifiques contenus dans les équations de ces formalismes (Flenet et al., 2004). Nous illustrons ici cette démarche dans le cas de l'adaptation de

STICS à la betterave, dans le contexte cultural de l'Europe du Nord, pour la récolte de la racine tubérisée et non pour la production de graines.

II.1. Choix des formalismes.

Certains choix de formalismes s'appuient sur les connaissances écophysiologiques et agronomiques de la plante que l'on cherche à représenter. Ainsi, sachant que la mise en réserve de saccharose dans la racine tubérisée de la betterave est concomitante et concurrente de la croissance foliaire, nous avons choisi de décrire la betterave avec les formalismes prenant en compte le stress trophique introduit par cette concurrence. D'autres choix sont en revanche dictés par le point de vue de l'utilisateur : quelle est la variable de sortie qui m'intéresse ? Quel est le processus auquel j'attache le plus d'importance, ou quel est celui qu'il m'importe peu de bien représenter ? Ainsi, afin de pouvoir comparer nos mesures expérimentales aux variables de sortie du modèle (pour ajuster, puis pour valider STICS) nous avons choisi de simuler le LAI plutôt que le taux de couverture. Enfin, certains choix sont réalisés par défaut, rendus obligatoires en raison du manque de données ou d'informations sur la plante et son environnement.

II.2. Détermination des valeurs de paramètres.

La façon de déterminer la valeur d'un paramètre dépend de la sensibilité des variables d'intérêt à ce paramètre, et des informations disponibles. Plus la sensibilité à un paramètre est forte, plus la détermination de sa valeur devra être précise. Pour les paramètres les plus sensibles on peut avoir le choix entre une valeur puisée dans la bibliographie ou extraite de mesures, et une valeur estimée par une méthode mathématique d'ajustement non linéaire (minimisation d'écarts entre valeurs de variables de sorties simulées et observées).

C'est pourquoi, une analyse de sensibilité permet en premier lieu de mettre en évidence, pour la combinaison de formalismes choisis et dans les conditions pédoclimatiques données, les paramètres les plus influents sur les variables de sortie qui nous intéressent. Pour les paramètres que l'on choisit d'estimer par ajustement, l'analyse de sensibilité permet de définir

- l'ordre d'ajustement, en fonction de l'interdépendance des modules (Ruget et al., 2002)
- les variables de sortie sur lesquelles réaliser l'ajustement,
- les conditions expérimentales de mesures de ces variables de sortie (par exemple, des conditions de stress hydrique), sachant que certains paramètres n'exercent leur influence que dans ces conditions.

Ceci est illustré dans le cas de l'adaptation à la betterave (Figure 2).

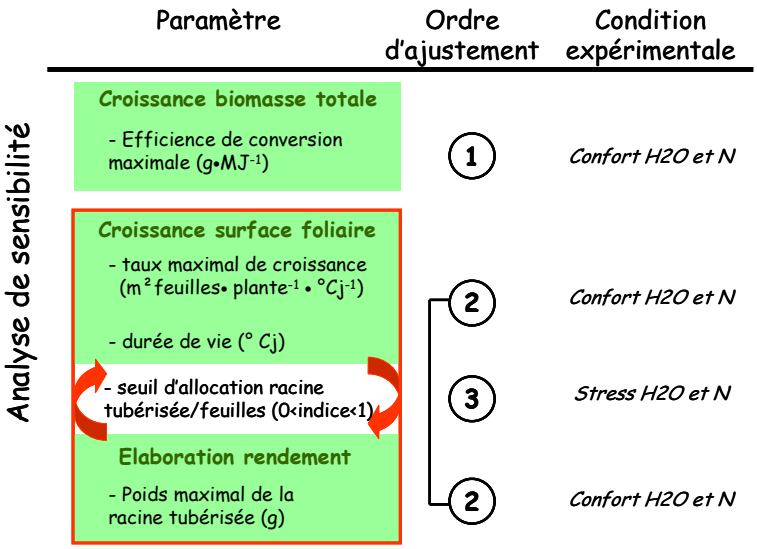


Figure 2. Résultats pour la démarche, de l'analyse de sensibilité dans le cas de l'adaptation à la betterave.

Une fois réalisées l'analyse de sensibilité et la caractérisation des données disponibles, l'utilisateur doit choisir un mode de détermination de la valeur de chaque paramètre. Plusieurs modes sont possibles, selon que l'utilisateur souhaitera utiliser une méthode d'ajustement de l'ensemble des paramètres, incluant la prise en compte d'informations a priori (Combal et al., 2002) puisées dans la bibliographie, des mesures expérimentales ou sa propre expertise, ou bien qu'il préfèrera n'avoir recours à des méthodes d'ajustement que pour les paramètres les plus sensibles et non mesurables directement, après avoir fixé les autres paramètres (Tableau 1). Etant donné le nombre de paramètres spécifiques de STICS, le premier mode de détermination représente pour l'instant des temps de calcul rédhibitoires (Tremblay & Wallach, 2004). Enfin, la cohérence des valeurs estimées des paramètres doit être vérifiée, par confrontation des valeurs obtenues à celles attendues (prises dans la biblio, ou par analogie à d'autres espèces).

Paramètres	Sensibles	Peu ou non sensibles
Accessibles dans la biblio, dans d'autres modèles ou par analogie	Ajustement éventuel selon la fiabilité et le domaine de validité des infos disponibles	Valeurs prises dans la biblio, d'autres modèles ou déduites par analogie
Mesurés ou calculables à partir des données expérimentales disponibles	Mesures ou calculs conseillés	Mesures ou calculs à privilégier
Non accessibles dans la biblio, dans d'autres modèles ou par analogie, non mesurés ou calculables	Ajustement obligatoire	Analogie à une autre espèce (toujours possible avec STICS)

Tableau 1. Choix du mode de détermination des valeurs de paramètres en fonction des résultats de l'analyse de sensibilité et des données disponibles.

Une fois le modèle adapté, son évaluation sur un jeu de données indépendant permet de définir avec quelle précision il est capable de simuler les variables de sortie dans son domaine de validité.

Discussion et conclusion

Le groupe d'utilisateurs formé il y a deux ans a cherché à élaborer une méthode générique d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures. Il ne s'agit pas d'une méthode figée mais plutôt d'une démarche ponctuée par des questions proposées à l'adaptateur. La notice explicitant cette démarche, et sur laquelle s'appuie cette présentation, propose des exemples et fournit des jalons pour la réflexion propre de l'adaptateur. Ainsi, pour la première partie de la démarche, elle souligne l'enjeu de l'utilisation de tel formalisme plutôt que tel autre, elle hiérarchise les choix, elle montre la cohérence entre formalismes et types de simulations souhaités. La notice donne un inventaire des données nécessaires pour l'ajustement et l'évaluation du modèle ainsi que des outils pour vérifier la cohérence de ces données. Enfin, elle propose des méthodes d'analyse de sensibilité et d'estimation des paramètres, ainsi que des critères de choix de ces méthodes.

La notice entièrement rédigée sera disponible à la fin de l'année 2005.

References

Brisson, N., et al. (2003). *European Journal of Agronomy, 18,* 309-332.
Combal, B., et al. (2002). *Remote sensing of Environment, 84, 1-15.*
Flenet, F., et al. (2004). *Agronomie, 24, 6-7,* 367-381.
Ruget, F., et al. (2002). *Agronomie, 22, 2,* 133-158.
Tremblay, M., Wallach, D. (2004). *Agronomie, 24,* 351-365.

Assimilation des caractéristiques du sytème sol-racines par simulation du potentiel de base en parcelle viticole

Jean-Christophe PAYAN[1], Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI[2], Nadine BRISSON[2], Isabelle de MUNTER[1]

(1) : ITV France - unité de Montpellier, Domaine de Piquet, route de Ganges, F-34790 GRABELS

Tél. : 04 99 23 33 00 Fax : 04 99 23 33 09 E_mail : jean-christophe.payan@itvfrance.com

(2) : INRA - unité Climat Sol Environnement, Site Agroparc, Domaine Saint-Paul, F-84914 AVIGNON CEDEX 9

Introduction

La culture de vignes à production de raisin de cuve revêt une dimension culturelle originale dans le monde agronomique. En effet, la valorisation du produit fini, le vin, est la résultante d'une alchimie complexe liant l'obtention d'une matière première « de qualité » à un itinéraire œnologique. Cette qualité est le fruit de l'expression d'un terroir, c'est-à-dire l'ensemble des interactions entre le sol, la plante, le climat et les façons culturales. En comparaison avec d'autres cultures, la viticulture a ceci de différent, qu'elle est volontairement implantée dans des situations où les facteurs limitants peuvent être nombreux dans un but unique : « faire souffrir la vigne afin qu'elle donne le meilleur d'elle-même ». Ceci se traduit en termes agronomiques par la recherche d'un fruit dont la qualité technologique est bien sûr dépendante de la présence de produits issus du métabolisme primaire (sucres, acides), mais également et surtout de produits issus du métabolisme secondaire (polyphénols et anthocyanes responsables de la structure et de la coloration des vins, précurseurs d'arômes…). Historiquement, les vignobles ont ainsi été implantés sur des terrains souvent ingrats et extrêmement diversifiés, tant du point de vue de leurs caractéristiques physico-chimiques que des possibilités de prospection racinaire (de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres de profondeur). Cette extrême hétérogénéité complexifie la compréhension des conditions de production viticole, en particulier le comportement hydrique de la vigne. C'est à cette fin que différents outils de mesure de la contrainte hydrique de la vigne ont été étudiés ces dernières années (Choné et *al.*, 2000 ; Payan, 2003 ; Carbonneau et *al.*, 2004), le potentiel hydrique foliaire de base (Ψb) étant la référence en région méditerranéenne. Le but de cette étude est de définir les caractéristiques permanentes du système sol-racines au travers d'une optimisation du modèle STICS sur cette variable d'état hydrique de la vigne mesurée à la parcelle. Une étape préliminaire à ce travail a consisté en l'adjonction d'un sous-module de calcul du Ψb au modèle STICS. Un test de sensibilité des différents paramètres du sol interagissant sur le calcul du Ψb a permis d'identifier les critères pertinents d'optimisation pour définir les caractéristiques permanentes du système sol-racines.

1. Module « calpsibase » : méthode de calcul du Ψb

La mesure du potentiel hydrique d'une feuille est réalisée en utilisant une chambre à pression (Schollander et *al.*, 1965). Mesuré en fin de nuit, juste avant le lever du soleil, le potentiel hydrique d'une feuille est représentatif de celui de la plante entière. En effet, les stomates étant fermés et la transpiration quasi-nulle pendant la nuit, la plante rééquilibre son potentiel hydrique avec celui du sol. Ce potentiel hydrique foliaire, dit « de base », est ainsi directement lié à la quantité d'eau disponible dans le sol (Van Leeuwen et Segin, 1994 ; Lacape et *al*,

1998 ; Riou et Lebon, 2000 ; Lebon et *al.*, 2003 ; Pellegrino, 2003, Payan, 2003 ; Payan et *al.*, 2003 ; Carbonneau et *al.*, 2004).

L'introduction du calcul du Ψb dans le modèle STICS, a été réalisée en considérant que la contribution d'un horizon du sol au Ψb est proportionnelle à sa densité de racines et à son potentiel hydrique. L'équation est la suivante :

<u>*équation 1*</u> $$\Psi base = \sum_{couche} \frac{d_{racinaire(i)} \times \psi_{sol(i)}}{\sum d_{racinaire}} \text{ avec } \psi_{sol} \rangle pFp$$

où : **Ψbase** = potentiel hydrique foliaire de base calculé ;
$\mathbf{d_{racinaire(i)}}$ = densité racinaire de l'horizon i ;
$\mathbf{\Psi_{sol(i)}}$ = potentiel hydrique du sol de l'horizon i ;
pFp = point de flétrissement permanent.

Dans cette approche, le potentiel hydrique du sol est calculé à partir d'un formalisme de Clapp et Hornberger (1978) décrivant l'allure exponentielle des courbes de rétention :

<u>*équation 2*</u> $$\Psi_{sol} = \Psi sol_s (\frac{W}{W_s})^{-b}$$

où : $\mathbf{\Psi sol_s}$ = potentiel hydrique du sol à saturation
Ws = humidité du sol à saturation
W / Ws = humidité relative du sol.

Clapp et Hornberger (1978) indiquent que les paramètres « b » et « Ψsol_s » dépendent du type de sol. Différents tests et analyses de sensibilité ont montré les possibilités d'estimation de ces paramètres à partir de la détermination de l'humidité pondérale de la terre fine à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, et à partir de la densité apparente du sol, pour chaque horizon considéré. Dans cette approche, Ψsol varie de –0,03MPa à –1,5MPa entre le moment où le sol est à la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. L'humidité relative du sol a été approchée par l'équation suivante (Brisson, *comm. pers.*) :

<u>*équation 3*</u> $$\frac{W}{Ws} = \frac{H}{\frac{1}{da} - \frac{1}{2,66}}$$

où : **H** = humidité pondérale de la terre fine.
da = densité apparente de la terre fine.

Cette méthode de calcul du Ψb simule correctement l'évolution de la contrainte hydrique en regard des observations de terrain. Cependant, les ordres de grandeurs proposés par la simulation ne sont pas en adéquation avec les mesures réalisées. Les composantes climatiques et les conditions d'établissement de la végétation étant par ailleurs bien renseignées, seule une meilleur définition des caractéristiques édaphiques et racinaires permettrait d'optimiser la simulation du Ψb.

2. Stratégie de définition des caractéristiques du système sol-racines

Les paramètres du sol permettant une optimisation de la simulation du Ψb sont au nombre de sept dans le modèle STICS : profondeur d'un obstacle racinaire / teneur en cailloux / type de cailloux / humidité de la terre fine à la capacité au champ / humidité de la terre fine au point de flétrissement permanent / densité de racines initiale. Différents tests de sensibilité ont été réalisés pour hiérarchiser l'importance de ces paramètres dans la simulation du Ψb en regard des RMSE (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) et MD (déviation moyenne) obtenues. Il ressort de ces différentes analyses que les paramètres les plus sensibles à l'optimisation sont :

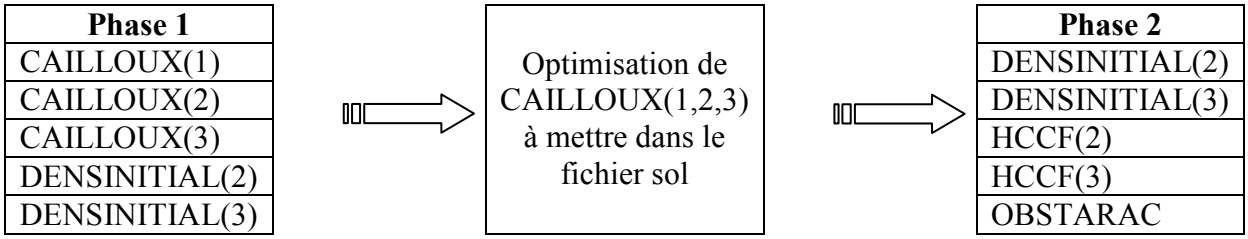
- (1) la profondeur d'un obstacle racinaire (OBSTARAC)
- (2) l'humidité à la capacité au champ (HCCF)
- (3) la densité de racines initiale (DENSITINIAL)
- (4) la teneur en cailloux (CAILLOUX)

En effet, l'humidité de la terre fine au point de flétrissement permanent étant étroitement lié à l'humidité de la terre fine à la capacité au champ, il est peu opportun d'optimiser les deux paramètres à la fois ; seul HCCF a été retenu. Par ailleurs, le type de cailloux est un paramètre assez peu sensible d'une part et facile à renseigner d'autre part ; il n'est donc pas retenu dans la définition d'une stratégie d'optimisation.

Il résulte de cette étape que, compte tenu de la prise en compte de trois horizons dans le modèle STICS et de l'absence de racine dans l'horizon 1 (défini comme horizon de surface : 10cm), l'optimisation de la simulation du Ψb à partir des caractéristiques du système sol-racines concerne 8 paramètres :

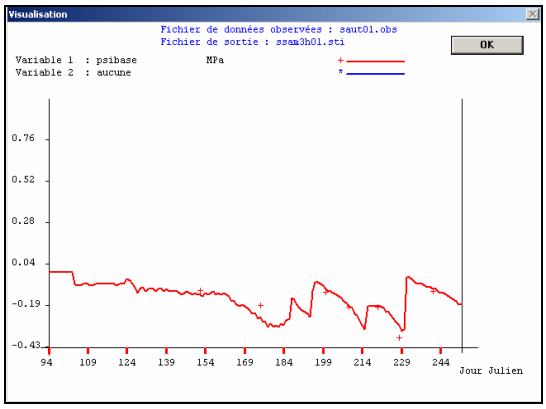
- horizon 1 : CAILLOUX(1)
- horizon 2 : CAILLOUX(2) ; HCCF(2) ; DENSITINIAL(2)
- horizon 3 : CAILLOUX(3) ; HCCF(3) ; DENSITINIAL(3)
- OBSTARAC

Le module d'optimisation de STICS sur une variable observée ne permettant de travailler au plus que sur 5 paramètres simultanément, une stratégie d'optimisation en deux phases a donc été retenue. La première étape de l'optimisation concerne les paramètres les plus sensibles, qui sont ensuite fixés pour optimiser les paramètres moins sensibles. L'optimisation se fait sur des paramètres préalablement bornés afin d'éviter l'apparition de minimums locaux (méthode bayesienne).



II résulte de cette stratégie d'optimisation une bonne simulation annuelle des Ψb (**figure 1**) et une définition acceptable des caractéristiques du système sol-racines : RMSE de 0,03 à 0,04 sur trois années contrastées d'étude (**tableau 1**).

Cependant ces paramètres présentent des différences importantes entre années alors qu'ils devraient être constants. La cause pourrait être la variation du poids pris par chaque paramètre dans la modélisation en fonction des caractéristiques climatiques de l'année en cours d'une part, et du nombre de relevés de Ψb effectués d'autre part. Cette méthode ne permet donc pas de donner une définition des paramètres de sol robuste dès la première année d'application, mais renseigne avec exactitude sur les conditions d'alimentation en eau de la plante au cours de l'année, ce qui représente un atout incontestable pour la compréhension du système de culture.



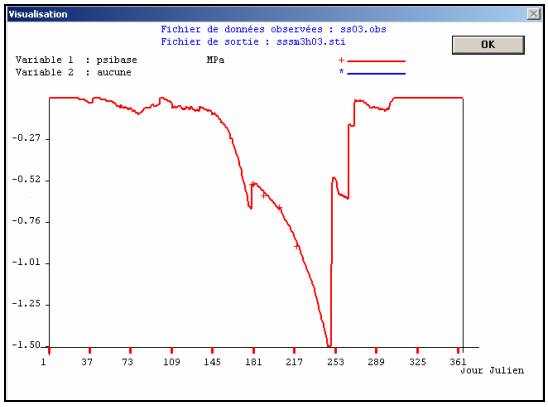


Figure 1 ***Exemple de simulation du Ψb après optimisation des paramètres du système sol-racines sur les parcelles viticoles de Sauteyrargues-Hérault pour l'année 2001 (figure de gauche) et de Serres-Vaucluse pour l'année 2003 (figure de droite) .*** *Ψb simulé = trait continu, Ψb mesuré = +.*

Tableau 1 ***Description des caractéristiques du système sol-racines sur la parcelle viticole de Sauteyrargues (Hérault) après optimisation sur le potentiel hydrique foliaire de base.***
Comparaison des valeurs après optimisation sur un an et trois ans avec les valeurs moyennes optimisées et mesurées.

Paramètres	2001	2002	2003	2001+2002+2003	Moyenne (2001/2002/2003)	Valeurs mesurées
CAILLOUX(1)	59.81	70.7	61.7	73.21	64.05	50
CAILLOUX(2)	55.92	74.1	66.7	75.28	65.57	45
CAILLOUX(3)	62.69	96.2	94.7	96.59	84.54	85
HCCF(2)	19.65	21.2	20.1	20.13	20.29	22.50
HCCF(3)	30.91	26.4	25.5	22.69	27.6	27.50
DENSINITIAL (2)	0.051	0.06	0.05	0.03	0.051	0.11
DENSINITIAL (3)	0.052	0.05	0.07	0.097	0.057	0.04
OBSTARAC	100.9	98.5	95.7	167.89	98.37	120
RMSE	**0.038**	**0.04**	**0.03**	**0.1336**	**0.2693**	**0.32**

Conclusion

L'objectif de cette étude était de coupler le potentiel foliaire de base, indicateur sensible de l'état hydrique de la vigne qui représente l'accessibilité à la réserve en eau du sol, au modèle de culture STICS afin de renseigner les caractéristiques du sol difficilement mesurables.
Le travail réalisé a permis en premier lieu d'introduire dans le modèle un formalisme permettant la simulation du potentiel foliaire de base, qui s'avère robuste. Ce travail a abouti à la mise en place d'une stratégie permettant d'estimer les paramètres du sol à partir des mesures de potentiels hydriques foliaires de base. Les résultats obtenus montrent un bon apprentissage annuel des paramètres mais ne permet pas de les définir de façon stable. La définition des paramètres du sol peut nécessiter la poursuite de l'étude en intégrant d'autres années ou d'autres parcelles à la base de données, mais en s'attachant au poids des autres modules qui peuvent interagir avec le bilan hydrique dans la qualité de la simulation (module développement de la biomasse, bilan azoté,…).
À terme, l'utilité du paramétrage de STICS avec les potentiels foliaires de base serait de définir les caractéristiques permanentes des sols d'une parcelle. Dès à présent, le travail réalisé apporte un avantage certain dans l'adaptation du modèle de culture STICS aux

exigences de la filière viticole, qui demeurent en premier lieu dans une meilleure compréhension des interactions entre le climat, le sol et la plante pour une bonne adaptation des itinéraires techniques en fonction des objectifs de production souhaités.

Bibliographie

Carbonneau A., Deloire A. et Costanza P. 2004 Le potentiel hydrique foliaire: sens des différentes modalités de mesure. *Journal International de la Science de la Vigne et du Vin*, 38, n°1 : 15-19.

Chone X., Tregoat O., Leeuwen C.V. et Dubourdieu D. 2000 Déficit hydrique modéré de la vigne: parmi les 3 applications de la chambre à pression, le potentiel tige est l'indicateur le plus précis. *Journal International Scientifique de la vigne et du vin*, 34, n°4 : 169-176.

Clapp R.B. et Hornberger G.M. 1978 Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water ressources research*, 14, n°4 : 601-604.

Lacape M.J., Wery J. et Annerose D.J.M. 1998 Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *Fied Crop Res.*, 57 : 29-43.

Lebon E., Dumas V., Piéri P. et Shultz R.H. 2003, Modelling the seasonnal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functionnal Plant Biology*, 30 : 699-710.

Payan J.C. 2003 Diagnostic du stress hydrique. *Compte-Rendu d'Activité par Projet 2001-2002*, éd. ITV France : 34-38.

Payan J.C., Ramel J.P., Martinez A.M. et Salançon, E. 2003 Sécheresse et canicule en 2003: caractérisation climatique et méthodes d'identification au vignoble. *14ème colloque viticole et oenologique. EUROVITI, novembre 2003, Montpellier* : 99-110.

Pellegrino A. 2003 Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique utilisable sur la vigne en parcelle agricole par couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'indicateurs de fonctionnement de la plante. *Thèse ENSAM*, 138p.

Riou C. et Lebon E. 2000 Application d'un modèle de bilan hydrique et de la mesure de la température de couvert au diagnostic du stress hydrique de la vigne à la parcelle. *Bulletin de l' O.I.V.*, vol 837-838 : 756-764.

Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreer, E.D., and Hemmingsen, E.A. 1965 Sap pressure in vascular plants. *Science* 148 : 339–346

Van Leeuwen C. et Seguin G. 1994 Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété cabernet franc, Saint-Emilion 1990). *Journal International de la Science de la Vigne et du Vin*, 28, n°2 : 81-110.

Une boite à outils pour modèles de culture (BAO-MdC)

M.-H. Moirez-Charron*, D. Wallach, C. Hue
INRA UMR ARCHE, B.P. 27, 31326 Castanet Tolosan Cedex
**Contact: mcharron@toulouse.inra.fr*

INTRODUCTION

L'objectif de BAO-MdC est de fournir un ensemble de fonctionnalités pour analyser, évaluer et paramétrer des modèles de culture.

En effet, pour mettre au point un modèle de culture, il y a un travail de modélisation du système biophysique proprement dit, mais il y a également un important travail pour analyser, évaluer et paramétrer le modèle. Pour faire ce dernier travail, il faut entre autres des outils qui permettent de faire aisément des simulations multiples, de faire des analyses de sensibilité et d'ajuster des paramètres du modèle à un jeu de données. Malgré un très large consensus sur l'importance de ces outils, il est rare que le logiciel codant un modèle de culture les fournisse. Il semble alors intéressant de programmer ces outils indépendamment du modèle de culture, mais de telle façon que tout modèle de culture puisse en profiter. C'est la motivation pour le logiciel BAO-MdC.

POUR QUELS MODELES DE CULTURES ?

BAO-MdC est conçu pour travailler avec une grande gamme de modèles de culture. Les seules contraintes de base sont que les entrées du modèle soient lues à partir de fichiers d'entrée, que les sorties soient écrites dans des fichiers de sortie et que le simulateur ait un module exécutable qui puisse être lancé à partir d'un autre programme sous Windows. Une grande diversité de formats pour les fichiers d'entrée est acceptable, mais il y a néanmoins des limitations.

Pratiquement, pour travailler avec un nouveau modèle il faut d'abord décrire la structure des fichiers d'entrée et des fichiers de sortie sous une forme compréhensible par BAO-MdC. C'est un travail à faire une seule fois, ensuite toutes les fonctionnalités de la BAO-MdC sont disponibles pour ce modèle.

Le logiciel BAO-MdC a jusqu'ici été testé pour STICS 4 et 5 et partiellement pour STICS 6, pour CROPGRO et pour 2 modèles utilisés à l'UMR ARCHE (2CV, MINI-STICS).

Le logiciel n'est pas encore distribué, mais peut être fourni à des chercheurs prêts à participer à la phase de test. Pour plus d'informations contacter le premier auteur.

LES OUTILS DE BAO-MdC

Le logiciel permet de faire des simulations multiples automatiquement. On spécifie pour chaque paramètre ou variable d'entrée à étudier une gamme de variation et un pas. BAO-MdC prépare les fichiers d'entrée correspondants à toutes les combinaisons de valeurs et lance le simulateur autant de fois qu'indiqué. Les calculs peuvent se faire pour une seule campagne ou automatiquement pour une liste de campagnes. (Une campagne est définie par le sol, climat, variables initiales et itinéraire technique).

Le logiciel peut effectuer des analyses de sensibilité. Deux algorithmes autres que l'analyse de sensibilité la plus simple ont été programmés. Les détails sont fournis ci-dessous.

Le logiciel peut produire une comparaison entre valeurs observées et valeurs calculées. Pour cela il faut définir la structure des fichiers d'observation ainsi que la correspondance des noms entre variables observées et variables calculées. Cette fonctionnalité est surtout un premier pas vers deux nouveaux outils en projet, l'un étant le calcul de distances entre valeurs calculées et valeurs observées et l'autre l'estimation des paramètres du modèle.

ANALYSE DE SENSIBILITE

Une méthode classique pour analyser le comportement d'un modèle de culture est l'analyse de sensibilité, où on évalue comment une variable de sortie Y varie quand des variables d'entrée ou des paramètres varient. Par la suite, « facteur » représentera soit une variable d'entrée soit un paramètre à étudier. Le logiciel BAO-MdC permet actuellement de faire une analyse de sensibilité de 4 façons différentes.

Une variable de sortie en fonction d'un facteur

Une façon importante pour étudier l'impact d'un facteur sur Y est de calculer Y pour toute une série de valeurs du facteur, afin de pouvoir visualiser Y en fonction de ce facteur. Pour ce calcul, on fixe tous les autres facteurs à leurs valeurs standard. Par exemple, on pourrait calculer Y quand le facteur i prend les valeurs 0.0, 0.1, 0.2,…100.0. L'outil « multi-simulation » de BAO-MdC permet de faire ce type d'étude facilement.

Indice de sensibilité simple

L'indice de sensibilité simple de Y par rapport à un facteur i est calculé en faisant varier le facteur i entre sa valeur standard X_i et une valeur différente $X_i + \Delta_i$. Tous les autres facteurs gardent leurs valeurs standard. Alors l'indice de sensibilité simple est

$IS_i = \left[Y(X_i + \Delta_i) - Y(X_i)\right] / \Delta_i$.

Cet indice peut être calculé avec BAO-MdC, mais les calculs ici sont suffisamment simples que BAO-MdC n'a pas d'avantages par rapport à une utilisation directe du simulateur.

La méthode MORRIS

L'indice de sensibilité simple risque de ne pas bien représenter la sensibilité de Y par rapport à un changement du facteur i. D'abord, par hypothèse tous les facteurs sont incertains, et donc on ne connaît pas parfaitement bien leurs valeurs. Cela suggère qu'il faudrait calculer un indice de sensibilité d'un facteur i en moyenne sur les valeurs possibles des autres facteurs. De plus, IS_i dépendra de l'intervalle de X_i exploré. L'effet sur Y de passer de X_i =10 à X_i =20 ne sera pas nécessairement le même que de passer de X_i =20 à X_i =30. Cela suggère qu'il faudrait calculer un indice de sensibilité moyen pour différents intervalles de X_i.

La méthode Morris est un algorithme pour estimer un indice de sensibilité pour chaque facteur en moyennant sur les valeurs possibles des autres facteurs et sur différents intervalles pour le facteur en question. Cette méthode est bien adaptée pour faire un classement des facteurs par ordre de sensibilité, avec un temps de calcul limité. Plus l'indice Morris est élevé, plus la sortie est sensible au facteur.

L'indice théorique

Pratiquement, on considère p valeurs possibles pour chaque facteur. Si par exemple le facteur X_i peut varier de X_{i0} à $X_{i0} + \Delta_i$ et p=4, alors les valeurs possibles sont $X_{i0}, \quad X_{i0} + \Delta_i / 3, \quad X_{i0} + 2\Delta_i / 3, \quad X_{i0} + \Delta_i$. L'indice de Morris pour le facteur i approxime la quantité suivante ;

$$M_i = \frac{1}{p^{n-1}(p-1)} \sum_{\alpha_1=0}^{p-1} \cdots \sum_{\alpha_{i-1}=0}^{p-1} \sum_{\alpha_i=0}^{p-2} \sum_{\alpha_{i+1}=0}^{p-1} \cdots \sum_{\alpha_n=0}^{p-1} (Y_{\alpha_1,\ldots\alpha_{i-1},\alpha_i+1,\alpha_{i+1},\ldots\alpha_n} - Y_{\alpha_1,\ldots\alpha_{i-1},\alpha_i,\alpha_{i+1},\ldots\alpha_n}) / \Delta_i$$

Où n est le nombre de facteurs et

$$Y_{\alpha_1,\ldots\alpha_n} = Y\left[X_1 + \Delta_1\alpha_1/(p_1-1), \ldots X_n + \Delta_n\alpha_n/(p_{i-1}-1)\right]$$

Calcul de l'indice

Le nombre de simulations avec le modèle nécessaire pour calculer M peut être très important. Pour n=15 et p=4 par exemple, il faudrait $3x4^{14}$ □ $8x10^{8}$ passages du modèle. L'algorithme Morris ne fait pas tous ces calculs. Il choisit un échantillon de valeurs pour chaque facteur, fournissant ainsi une approximation à l'indice M_i. L'astuce de l'algorithme est de choisir ces valeurs de façon efficace.

Mise en œuvre avec BAO-MdC

L'utilisateur définit les facteurs à étudier, la valeur minimale et maximale pour chacun et le nombre p de valeurs qui seront étudiées pour chaque facteur. Il définit également les variables de sortie d'intérêt (par exemple, rendement, biomasse finale, eau du sol final etc.) et les campagnes pour l'étude. Enfin, l'utilisateur précise une quantité liée au nombre de simulations qu'il est prêt à effectuer. .

Le logiciel fournit alors une approximation à l'indice M_i pour chaque facteur, chaque campagne et chaque variable de sortie. Il fournit également une mesure de la variabilité de la sensibilité, due au fait que les valeurs des autres facteurs varient ou que l'intervalle étudié varie.

La méthode EXTENDED FAST

La méthode EXTENDED FAST calcule la fraction de la variabilité totale d'une sortie Y due à chaque facteur qui varie. Les sensibilités sont entre 0 et 1. Cela a l'avantage que ces indices ont un sens clair et comparable entre différentes variables de sortie. De plus, EXTENDED FAST permet de calculer non seulement la contribution de chaque facteur seul à la variabilité d'une sortie, mais également la contribution totale d'un facteur, qui inclut la contribution de ce facteur en interaction avec tous les autres facteurs. (Par exemple, il se peut que le fait de faire varier simultanément X_1 et X_2 a plus d'effet sur la sortie Y que la somme des effets de X_1 et X_2 individuellement. La différence est la contribution de l'interaction entre X_1 et X_2).

L'indice théorique

Si tous les facteurs varient dans leur domaine de variation, une sortie Y aura une certaine distribution de valeurs, avec une certaine variance var(Y). La contribution du facteur X_i à cette variance est $\mathrm{var}\left[E(Y \mid X_i)\right] / \mathrm{var}(Y)$. Ici $E(Y \mid X_i)$ est l'espérance de Y sur tous les facteurs sauf X_i. Le résultat est une fonction de X_i. Ensuite on prend la variance de cette fonction. Si cette variance est très faible par rapport à la variance totale de Y, cela veut dire que la variabilité de X_i contribue peu à la variabilité de Y. Si par contre cette valeur est proche de 1, alors l'essentiel de la variabilité de Y est due à la variabilité de X_i.

Calcul de l'indice

FAST est un acronym pour « Fourier amplitude sensitivity test ». L'idée derrière la méthode est de faire une série d'appels au modèle, avec des valeurs différentes des facteurs à chaque appel. Chaque facteur a sa propre fréquence de variation. Par exemple, un facteur avec une fréquence de 2 reviendra à sa valeur initiale 2 fois au cours de la série d'appels. Un facteur avec une fréquence de 5 reviendra 5 fois, etc. On donne une fréquence élevée ω à un seul facteur, celui dont on calcule l'indice avec cette série. Ensuite on calcule la contribution de chaque fréquence à la variabilité de Y. La contribution de la fréquence ω et de ses harmoniques donnent l'indice recherché.

Mise en œuvre avec BAO-MdC

La mise en œuvre est très similaire à celle de la méthode MORRIS. Une différence importante pourtant est que pour chaque facteur, variable de sortie et campagne on calcule maintenant 2 indices. Le premier représente l'effet du facteur seul. Le deuxième représente un indice de sensibilité total, qui est la somme de l'effet du facteur seul et de toutes ses interactions avec les autres facteurs.

Calcul de la date de debourrement de la vigne.
Le modèle BRIN

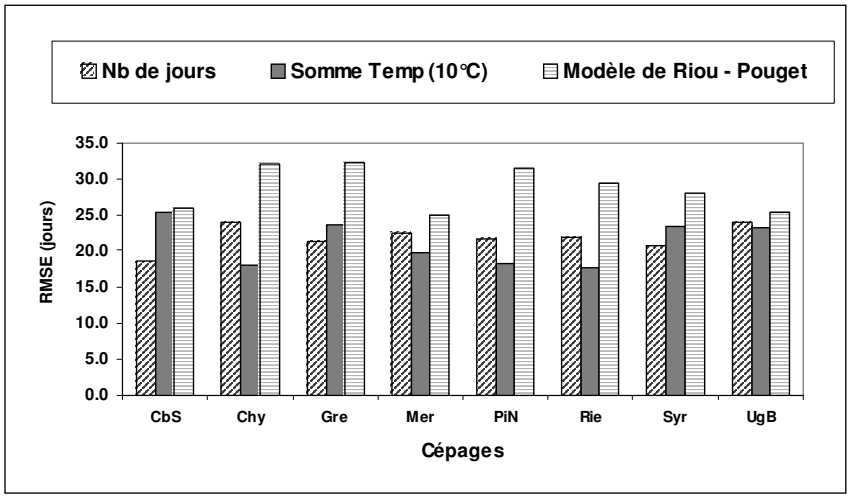
I. García de Cortázar Atauri [1*], N. Brisson [1], B. Seguin [2], J.P. Gaudillere [3]

(1) Unité Climat Sol Environnement, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914, Avignon cedex 9, France.
(2) Unité Agroclim, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914, Avignon cedex 9, France
(3) UMR Oenologie & Ampélologie, INRA, Domaine de la Grande Ferrade - BP 81, F-33883, Villenave d'Ornon cedex, France
*Corresponding author email: igarcia@avignon.inra.fr

La détermination de la date de débourrement est très importante en viticulture car elle marque le début du cycle du développement de la vigne. Son calcul est prépondérant lorsqu'on veut mettre au point un modèle de culture pour la vigne (Brisson et al. 2002), car ce stade va déterminer le début de la simulation. Cependant, la définition de cette date est très variable selon la localisation du vignoble considéré, le cépage et sa précocité, la date de taille (Williams et al. 1985 ; Huglin et Schneider, 1998).

Les méthodes déjà existantes

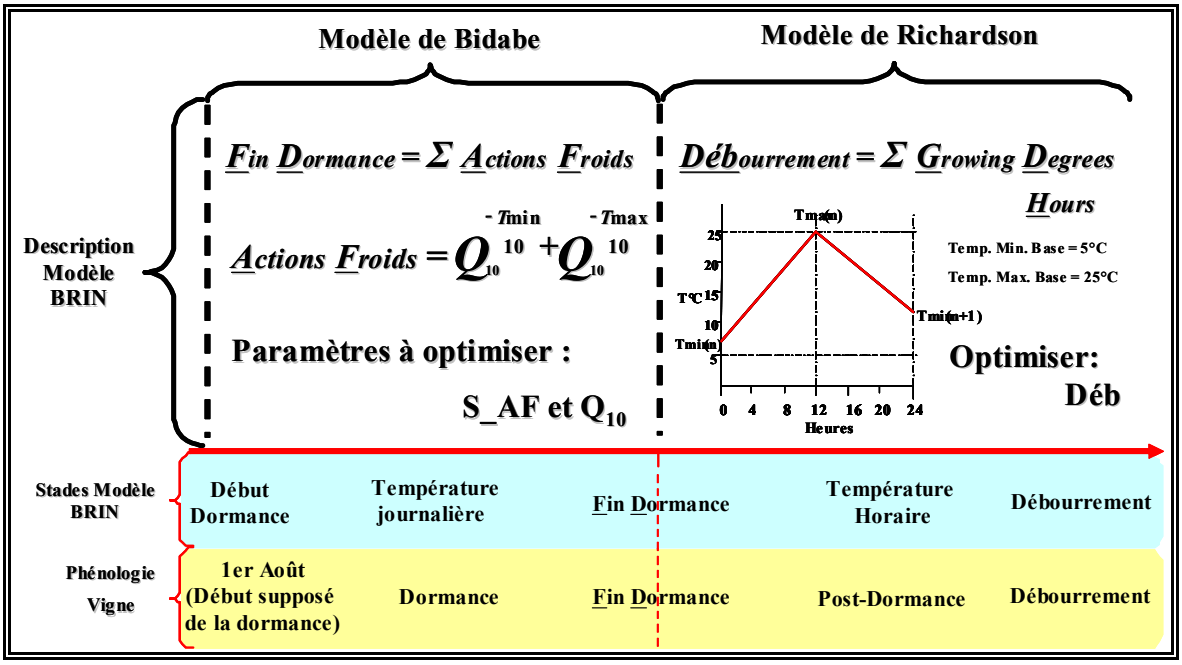
Une étude bibliographique nous a montré qu'il existe plusieurs méthodes de calcul de la date de débourrement. Des méthodes « simples » comme (1) le nombre de jours passés depuis une date fixe (MacIntyre et al. 1982) ou (2) la somme de températures journalières (en base 10°C) (Pouget, 1968; Bindi et al. 1996, Oliveira, 1998), et des méthodes plus complexes comme (3) le modèle de Pouget-Riou (Pouget 1989 ; Riou 1994) basée sur la somme « d'Actions Jour ».
Pour tester ces modèles, nous avons utilisé la base de données PHENOCLIM® (Unité Agroclim INRA-Avignon) qui regroupe des données phénologiques de plusieurs espèces/variétés d'arbres fruitiers et en particulier pour la vigne des données provenant de cépages dans toute la France. Nous en avons sélectionné 10 : Cabernet Sauvignon, Chasselas, Chardonnay, Grenache, Merlot, Pinot noir, Riesling, Sauvignon, Syrah, Ugni blanc ; implantés sur cinq sites différents (Bordeaux, Montpellier, Angers, Champagne et Colmar).



Le test des différents modèles sur la base PHENOCLIM® nous a montré que, ces méthodes ne sont pas généralisables (faible précision avec une RMSE au tour de 25 jours pour toutes les méthodes) (Figure 1). En effet, il existe une très forte dépendance du site et du cépage, et les performances des modèles sont meilleures pour les sites dans lesquels ils ont été calibrés. Par ailleurs, le fait de commencer le calcul à partir du 1er janvier, date à laquelle les auteurs considèrent que la vigne est déjà sortie définitivement de dormance, est une hypothèse très forte.
L'objectif de ce travail est de créer un modèle robuste de calcul de la date de débourrement pour plusieurs cépages qui puisse être utilisé sur l'ensemble de l'hexagone.

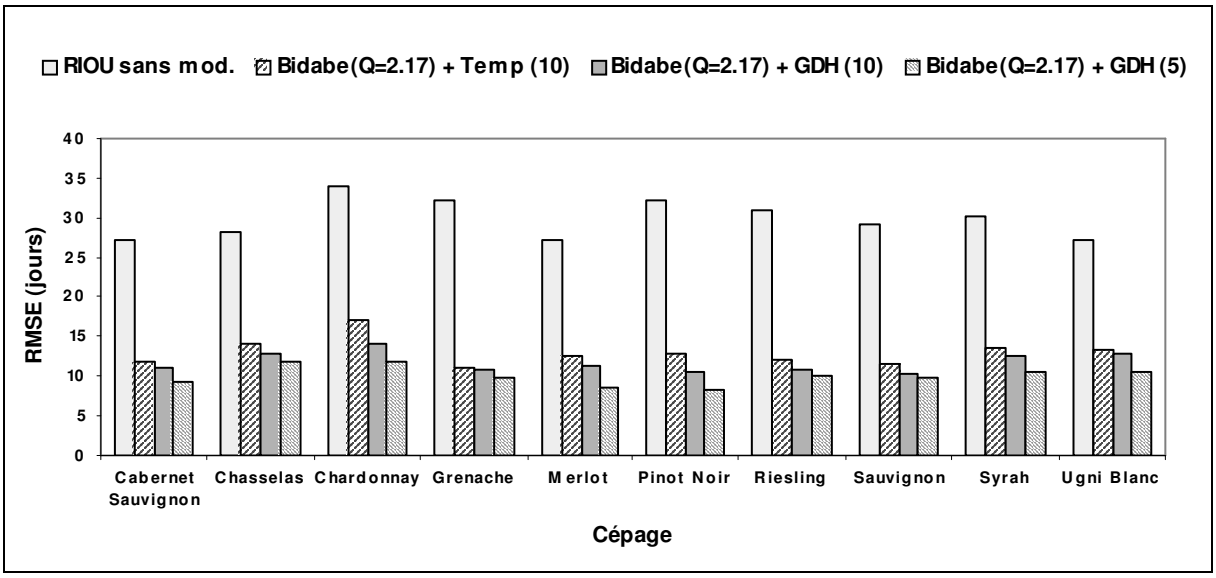
Le modèle BRIN

Le modèle que nous avons développé, le dénommé modèle BRIN, a comme principaux atouts l'introduction du calcul de la date de dormance, puis le calcul de la date de débourrement à partir des températures horaires. Pour cela, il utilise la combinaison de deux modèles : le modèle « d'Actions Froid » de Bidabe (1965) qui calcule la fin « réelle » de la dormance (paramètres : Q10 et la Somme d'Actions Froid) et le modèle GDH (Growing Degrees Hours) de Richardson (1974) pour le calcul de la date du débourrement à partir de la date de sortie de dormance (paramètres : Température Base horaire et la Somme de GDH) (figure ci-dessous).



Nous avons réalisé une analyse de sensibilité du modèle qui nous a permis de réduire le nombre de paramètres : le paramètre Q10 = 2.17 pour tous les cépages. Ensuite, nous avons réalisé plusieurs optimisations, en testant les possibilités suivantes comparées au modèle le plus fréquemment utilisé (le modèle Pouget - Riou) :

- Bidabe + une somme de températures journalières (temp. base 10°C) ;
- Bidabe + Richardson (temp. base 10°C) ;
- Bidabe + Richardson (temp. base 5°C).



On observe un saut quantitatif très important quand on passe d'un modèle qui ne simule pas la levée de dormance (Riou-Pouget) à des modèles qui réalisent un calcul agroclimatique de ce stade. En ce qui concerne les trois combinaisons testées, c'est la combinaison Bidabe + Richardson (Temp. 5°C) qui donne systématiquement la plus faible RMSE, de l'ordre de 10 jours, quel que soit le cépage. La méthode d'optimisation retenue (par validation croisée) nous a permis d'obtenir un jeu de paramètres spécifique pour chaque cépage.
Plusieurs auteurs ont déjà montré la possibilité que chaque cépage ait une température base différente (Pouget, 1988, Moncur et al. 1989). Pour cette raison, nous avons comparé les résultats du modèle en fixant la température de base à 5°C et en introduisant la température comme l'un des paramètres à optimiser.

		Température Base Spécifique		Temp. Base = 5°C
	Nb Observations	Temp. (°C)	RMSE (jours)	RMSE (jours)
Cabernet Sauvignon	63	1	8.94	8.3
Chasselas	89	6	11.15	11.7
Chardonnay	60	1	11.45	12
Grenache	40	1	9.75	9.6
Merlot	54	1	8	8.3
Pinot Noir	72	5	8.22	8.3
Riesling	64	6	9.28	10.2
Sauvignon	63	3	9.3	9.6
Syrah	64	0	9.86	10.2
Ugni Blanc	47	3	10.25	10.3

Les résultats finaux, résumés dans le tableau ci-dessus, nous montrent des améliorations infimes en utilisant une température base spécifique pour chaque cépage, ce qui ne justifie pas l'introduction de cette complexité supplémentaire.
Les validations qui ont complété notre étude, réalisée avec des données indépendantes de la base de données utilisée pour l'optimisation, ont montré une erreur moyenne d'entre **5 et 8 jours**.

Conclusion
Pour conclure, le modèle BRIN présente plusieurs améliorations par rapports aux autres modèles:

- D'une part, il montre l'importance de la prise en compte de la période de dormance pour le calcul de la date de débourrement. Nous avons calculé un cumul de températures actives (au dessus de 5°C) entre la date de sortie de dormance simulé par le modèle et le 1er janvier (date utilisée par les autres modèles pour déterminer le début de la simulation) qui peut varier d'entre 10 et 60 °C/jours (selon le cépage et la localisation).
- D'autre part, l'utilisation de températures horaires améliore légèrement le résultat par rapport à un calcul sur la base des températures journalières. Il ne semble pas nécessaire d'utiliser des températures base différentes selon le cépage.
- Finalement, le modèle présente comme principal avantage l'utilisation d'un seul jeu de paramètres par variété, utilisable dans toute la France.

Ce modèle a été développé dans le cadre d'une thèse réalisé à l'INRA d'Avignon, qui a comme objectif l'étude des impacts du changement climatique à l'aide du modèle STICS. Le modèle BRIN a été intégré dans le modèle STICS, pour permettre le calcul de la date de débourrement de la vigne.

BIBLIOGRAPHIE

Bidabe, B. 1965. L'action des températures surl'évolution des bourgeons de l'entrée en dormance à la floraison. 96. Congrès Pomologique, 51-56.

Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S. and Miglietta, F. 1996. The effect of elevated CO_2 concentration on grapevine growth under field conditions. Acta Hort. 427: 325-330.

Brisson, N., Gaudillère, J.P., Ramel, J.P. and Vaudour, E. 2002b. Utilisation du modèle de culture STICS pour renseigner les zonages viticoles. IVe symposium sur le zonage vitivinicole. Avignon, Juin. CD edited by OIV.

Huglin, P. et Schneider, C. 1998. Biologie et écologie de la vigne. Lavoisier, Paris. 370 pp.

Mcintyre, G. N., Lider, L. A. et Ferrari, N. L., 1982. The chronological classification of grapevine phenology. American Journal of Enology and Viticulture **33** (2).

Moncur, M. W., Rattigan, K., Mackenzie, D. H. et Mcintyre, G. N., 1989. Base temperatures for budbreak and leaf appearance of grapevines. American Journal of Enology and Viticulture **40** (1).

Oliveira, M., 1998. Calculation of budbreak and flowering base temperatures for Vitis vinifera cv. Touriga Francesa in the Douro Region of Portugal. American Journal of Enology and Viticulture **49** (1).

Pouget, R., 1968. Nouvelle conception du seuil de croissance chez la vigne. Vitis **7** p. 201-205.

Pouget, R., 1988. Le débourrement des bourgeons de la vigne : méthode de prévision et principes d'établissement d'une échelle de précocité de débourrement. Connaisance Vigne-Vin, 22 (2), 105-123.

Richardson E.A:, Seeley S.D. and Walzer D.R., 1974. A model for estimating the completation of rest for Redhaven and Elberta peach trees. HortScience, 9(4): 331-332.

Riou C. (1994) Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté Européenne. CEE Bruxelles, rapport EUR 15863 FR/EN, 321 pp.

Williams, D.W., Andris, H.L., Beede, R.H., Luvisi, D.A., Norton, M.V.K. et Williams, L.E., 1985. Validation of a model for the growth and development of the Thompsom Seedless grapevine. II. Phenology. American Journal of Enology and Viticulture 36 (4).

Différentiation du modèle STICS pour réaliser des analyses de sensibilité

C. Lauvernet
INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
** email:Claire.Lauvernet@avignon.inra.fr*

I. L'analyse de sensibilité

a. Pourquoi l'analyse de sensibilité?

Un modèle est une représentation simplifiée ou biaisée, plus ou moins réaliste de la variable d'état qu'il simule. C'est particulièrement le cas pour les modèles agronomiques, qui tentent de façon aussi déterministe que possible de reproduire le comportement de la culture, puisque le fonctionnement de la végétation n'est *a priori* pas décrit par des équations exactes. Lorsque l'on utilise un nouveau modèle, il est difficile de deviner quels paramètres auront plus de poids dans le modèle, sur lesquels porter plus d'attention en terme de précision, sur lesquels une perturbation engendrerait une différence conséquente en sortie. Ainsi, les besoins et les souhaits d'applications face à un modèle peuvent correspondre à :

- une meilleure compréhension du modèle : les liens entre entrées et sorties, l'influence de certaines variables d'état sur d'autres variables d'état…;
- l'amélioration de la qualité de la réponse du modèle : études d'erreur de modèle dues à un contrôle de qualité non rigoureux sur les variables d'entrées ("analyse d'incertitude" des variables d'entrée…)
- la simplification du modèle : optimisation du modèle en considérant constants certains paramètres auxquels le modèle n'est pas sensible, identification des variables auxquelles le modèle réagit le plus…

Ces objectifs trouvent une réponse avec l'analyse de sensibilité, méthode qui permet, par définition, d'*étudier l'impact d'une perturbation des paramètres de contrôle sur la sortie du modèle*.

b. Définition

Une analyse de sensibilité nécessite deux ingrédients indispensables:

⇒ **Un modèle** :

$$F(X , K) = 0$$

où X est la variable d'état (LAI, biomasse…) ; K sont les variables de contrôle du modèle (paramètres θ, variables de forçage…) dont le modèle a besoin pour décrire l'évolution de X ; F est un opérateur différentiel *a priori* non linéaire, de dimension finie. On suppose que pour K donné, le système a une unique solution X. θ inclus dans K représente en général certains paramètres du modèle agissant sur la variable d'état X.

⇒ **Une fonction réponse** G à valeur scalaire, qui exprime une ou plusieurs sorties du modèle dont on cherche à évaluer la sensibilité. G représente ces variables de sortie selon le comportement dont on veut connaître la sensibilité: leur norme, leur intégrale, leur valeur finale…

Lorsque l'on effectue une analyse de sensibilité, on cherche en fait à déterminer la sensibilité **de G par rapport à θ.**

Intuitivement, la sensibilité des sorties du modèle F (exprimées par G) par rapport à θ est l'effet d'une perturbation de θ sur les valeurs de G. De façon mathématique, la sensibilité S de G par rapport à θ est par définition le gradient de G par rapport à θ :

$$S = \nabla_\theta G$$

c. Description des différentes méthodes

L'analyse de sensibilité consiste grossièrement à perturber les paramètres d'entrée et étudier les conséquences en sortie du modèle, *la variation des variables de sortie du modèle lorsque les paramètres ou les variables*

explicatives varient (Molinari *et al.,* 2002 ; Saltelli *et al.,* 2000). Cette sensibilité d'un modèle par rapport à une perturbation peut se calculer par des méthodes déterministes ou stochastiques, et aboutir à une approximation du gradient ou à sa valeur exacte dans les directions souhaitées.

Les techniques d'échantillonnage sont les plus classiques et possèdent un coté très intuitif. Elles consistent globalement à parcourir aléatoirement l'espace des paramètres θ et à modéliser les relations entre entrées et sorties. Ce sont les méthodes les plus souvent développées sur les modèles agronomiques et en particulier sur STICS (*e.g.* Houlès, 2004 ; Ruget *et al.,* 2002). On note également la possibilité d'utiliser les différences finies, ou le modèle linéaire tangent pour déterminer les dérivées directionnelles (Grosbuis, 1998), qui doivent être évaluées dans le maximum de directions de l'espace de contrôle.

Les méthodes statistiques permettent une analyse de sensibilité *globale* mais ont l'inconvénient de dépendre très fortement de la façon de parcourir l'espace de contrôle et de ne permettre qu'une approximation du gradient. L'évaluation exacte du gradient de la fonction dans l'ensemble des directions de l'espace de contrôle n'est possible que par une méthode locale (valable au voisinage d'un point de l'espace de contrôle) utilisant le modèle adjoint (Ionescu and Cacuci, 2004). Une fois le modèle adjoint calculé, il suffit de l'exécuter aux voisinages des points qui correspondent à nos conditions, tandis que les méthodes globales nécessitent d'être remises en œuvre à chaque nouvelle situation.

II. Calcul du modèle adjoint de STICS

a. Comment dériver un modèle ?

La différentiation d'un modèle peut se faire soit de façon symbolique (dérivation formelle de chaque équation du modèle), ce qui demande au modèle de n'être exprimé que par des fonctions élémentaires, soit par un différentiateur automatique. La différentiation automatique nécessite seulement que le modèle soit écrit sous forme de code informatique. Elle génère alors un nouveau programme, qui exprime les dérivées analytiques de la fonction exprimée par le programme, par rapport aux variables et/ou paramètres que l'on a choisis. Nous ne détaillerons pas la méthode avec laquelle le nouveau code, dit *code adjoint*, est calculé, mais on peut se reporter à Hascoët and Pascual pour une description précise du différentiateur que nous avons utilisé dans ce travail : TAPENADE (INRIA Sophia-Antipolis). La méthode utilisée consiste à considérer un programme informatique comme une suite d'instructions élémentaires:

- opérations élémentaires (addition, multiplication. . .)
- fonctions élémentaires (exp, log, cos. . .)

et de commandes représentant des branchages (IF, FOR, GOTO. . .), à cause desquels la trajectoire de chaque variable doit être mémorisée et sauvegardée. Le code adjoint évolue en sens *rétrograde* par rapport au code direct (ou tangent), ce qui lui permet de faire face à des problèmes à très grande échelle. Il ne nécessite pas, comme le code tangent ou les différences finies, d'être évalué sur l'ensemble de l'espace de contrôle et ne dépend donc plus de sa dimension.

Avant d'appliquer la différentiation automatique à un code, il est indispensable d'avoir bien répondu aux questions suivantes :

- ⇒ Quelle est la branche du code direct à dériver et la routine tête ?
- ⇒ Quelles sont les variables dépendantes de sortie dont on veut calculer les dérivées ?
- ⇒ Par rapport à quelles entrées indépendantes veut-on dériver ?

Notons que nous devons choisir des entrées et des sorties dérivables, en évitant les entiers, dont la dérivée est nulle.

b. Les difficultés rencontrées avec STICS

La différentiation automatique permet la présence d'instructions interdites par la différentiation symbolique et offre un gain de temps considérable, mais elle nécessite que le modèle suive quelques règles d'hygiène bien particulières pour être différentiable : déclaration claire et explicite de tous les paramètres/variables , mise en valeur explicite des sorties, précision maximale des valeurs affectées (double précision si possible), et surtout minimalisation des branchages…La situation idéale pour éviter au maximum les difficultés est d'écrire le modèle dans ce but, mais ceci est rarement le cas, en particulier dans le domaine agronomique où cette technique n'a pas particulièrement été exploitée.

Le modèle STICS possède une quantité très importante de branchages qui le rendent très peu différentiable. Avec ses fortes discontinuités, il a mis à l'épreuve le différentiateur TAPENADE : seuils, conditions, affectations et boucles sont autant d'épreuves pour le différentiateur qui doit sauvegarder toutes les trajectoires

éventuelles, et reprendre le chemin en sens rétrograde. On comprend que lorsque les GOTO sont imbriqués les uns dans les autres et/ou croisés, il lui est très fortement difficile de ne pas "perdre la trajectoire". De fait, il consomme une mémoire de sauvegarde des trajectoires très importante que nous avons tenté de minimiser par le *checkpointing*, qui consiste à subdiviser une boucle en boucles imbriquées).

La dernière version du modèle STICS (STICS 6), si elle n'a pas été particulièrement adaptée à la différentiation automatique, a subi tout de même de fortes modifications lui conférant un aspect plus différentiable que les versions précédentes. Du coté de TAPENADE, la disparition de nombreux bugs ainsi que ses progrès pour dériver les modèles non linéaires (en particulier suite aux difficultés rencontrées avec STICS !) nous permettent d'envisager la différentiation des modèles agronomiques avec plus de facilité. La dernière version de TAPENADE (2.1, Janvier 2005) est capable de dériver le modèle STICS 5.2 que nous avons adapté et nous a permis d'effectuer différentes analyse de sensibilité avec un coût de calcul peu important.

III. Résultats : analyse de sensibilité locale de certaines variables d'état de STICS

a. Sélection des paramètres d'entrée pour l'analyse de sensibilité des variables de sorties

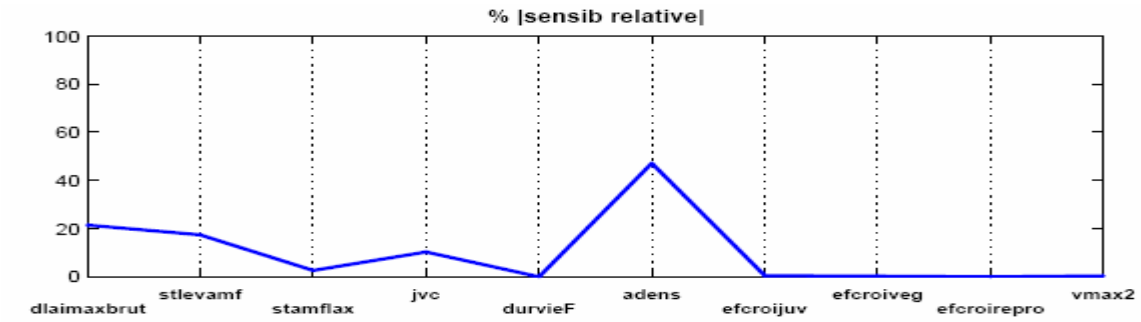
Pour cette étude de faisabilité, le modèle adjoint a été calculé en suivant les choix suivants :
Variables de sortie : le LAI et la biomasse (*masec*), exprimées par les fonctions réponses représentant leur intégrale sur l'ensemble du cycle.
Paramètres d'entrée : pour le LAI, nous avons choisi les paramètres variétaux agissant sur la dynamique du LAI, ainsi que *dlaimaxbrut*, qui caractérise fortement la croissance aérienne. Les paramètres variétaux ont été adaptés aux conditions de la base de données ADAM en Roumanie, dont la variété de blé (*Flamura*) possède des particularités vis-à-vis de la résistance au froid et de la phénologie. La méthode d'optimisation utilisée pour l'étalonnage est celle proposée par l'interface utilisateur STICS (algorithme du simplexe de Nelder-Mead), qui consiste à minimiser l'écart entre les simulations et les mesures de LAI par une exploration géométrique de l'espace des paramètres optimisés. Pour la biomasse, les efficiences à trois phases importantes du cycle du blé (phases juvénile, végétative et de remplissage des grains), ainsi que *vmax2* ont été choisis suite aux précédentes analyses de sensibilité conjuguées aux connaissances accumulées par les utilisatrices avignonnaises de STICS. Nous proposons dans le tableau suivant les valeurs de ces paramètres au voisinage desquelles la sensibilité a été calculée :

Param.	valeur
$dlai_{max}brut$	0.00044
$stlevamf$	208.298
$stamflax$	181.688
jvc	35.00
$durvieF$	160.00
$adens$	-0.60
$efcroijuv$	2.200
$efcroiveg$	4.250
$efcroirepro$	4.250
$vmax2$	0.050

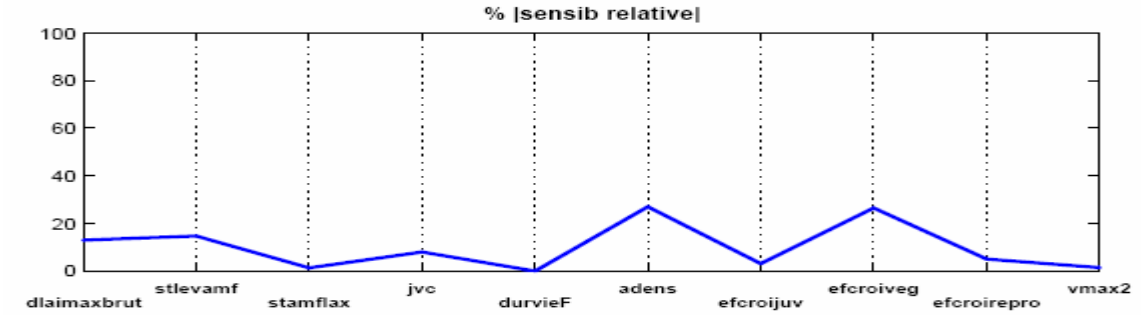
Valeur des paramètres au voisinage desquels la sensibilité du LAI et la biomasse sera calculée : étalonnage sur la variété roumaine flamura

b. Résultats de sensibilité du LAI et de la biomasse

L'analyse de sensibilité de la variable LAI a mené aux conclusions suivantes : les paramètres les plus influents sur la fonction réponse intégrant le LAI sur l'ensemble du cycle parmi ceux que nous avons considéré ici sont *adens* à 47%, *dlaimaxbrut* à 21%, *stlevamf* à 17%, *jvc* à 10%, et enfin *stamflax* à 2% . Pour la fonction réponse intégrant la biomasse, nous observons que la hiérarchie est modifiée par la forte influence de l'efficience *efcroiveg* qui est similaire à celle de *adens* (27%). *stlevmaf* et *dlaimaxbrut* sont également équivalents (14 et 12%). Enfin, on constate une sensibilité relativement faible (5% et 3%) de la biomasse intégrée sur le cycle aux deux autres paramètres d'efficience *efcroirepro* et *efcroijuv*.
Ces résultats vont relativement dans le sens des autres analyse de sensibilité effectuées auparavant sur le modèle STICS de façon globale. Cependant, le fait dans notre cas de n'étudier que l'intégrale sur l'ensemble du cycle implique une très faible influence des paramètres *efcroirepro* et *efcroijuv,* et une plus importante de *efcroiveg*. Ces efficiences sont caractéristiques de certains stades phénologiques, et on peut supposer qu'une analyse de l'intégrale du LAI entre deux stades consécutifs seulement, tels que DRP à MAT, conduirait à une autre hiérarchie des paramètres (Ruget *et al.*).



Sensibilité relative de la variable LAI en pourcentage aux 10 paramètres choisis, au voisinage des valeurs après étalonnage sur la base ADAM.



Sensibilité relative de la variable masec en pourcentage aux 10 paramètres choisis, au voisinage des valeurs après étalonnage sur la base ADAM.

Conclusion

Le modèle adjoint est un outil très intéressant pour effectuer des analyses de sensibilité puisqu'il nécessite son calcul une unique fois, puis doit simplement être exécuté dans de nouvelles situations. Le travail le plus difficile se situe donc dans la différentiation du modèle. Cependant, l'analyse de sensibilité locale n'est valable que dans un voisinage restreint et il est tout à fait possible que la hiérarchie soit modifiée dans d'autres conditions. Ces résultats ne constituent donc qu'une première étape du travail, et nous nous devons maintenant de continuer sur les étapes suivantes :

1. Effectuer l'analyse de sensibilité « multi-locale » en gardant les itinéraires techniques et le climat de la base ADAM, afin de généraliser la hiérarchie sur l'ensemble des valeurs possibles des paramètres dans les conditions ADAM . Pour cela, il faudra exécuter l'adjoint sur l'ensemble des intervalles de définition des paramètres en utilisant une échantillonnage suffisamment représentatif des valeurs possibles.
2. Appliquer cette analyse dans d'autres conditions (climatiques, pédologiques. . .) pour vérifier que la hiérarchie est conservée ou non de manière générale et sur d'autres variétés.
3. Etudier la sensibilité à plusieurs stades phénologiques du cycle afin de constater l'effet des variables temporellement valables (efficience en particulier) sur la hiérarchie générale.

Références.

P. Grosbuis. *Analyse de sensibilité d'un modèle de prédiction de rendement*. Mémoire de D.A.A., ENSA Rennes, 1998.
L. Hascoët et V. Pascual. Rt-*0300 - tapenade 2.1 user's guide*. Rapport technique, INRIA, Sophia Antipolis, 2004. 78p.
V. Houlès. *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 de Doctorat, INAPG, 2004.
M. Ionescu-Bujor and D.G. Cacuci. *A comparative review of sensitivity and uncertainty analysis of large-scale systems i : Deterministic methods*. Nucl. Sci. Eng.., 147(3) :189–203, July 2004.
N. Molinari. *Analyse de sensibilité*. In Ecole-Chercheurs. Pour une bonne utilisation des modèles de culture, chapitre 3. Wallach D. (ed.), 2002.
F. Ruget, N. Brisson, R. Delécolle, and R. Faivre. *Sensivity analysis of a crop simulation model, stics, in order to choose the main parameters to be estimated*. Agronomie, 22 :133–158, 2002.
A. Saltelli, K. Chan, and E.M. Scott. *Sensitivity Analysis*. John Wiley, Chichester, 2000.

Estimation des paramètres sols pour STICS à partir d'une base de données spatialisée sur les sols à petite échelle

C. Le Bas*, D. King, J. Daroussin, D. Arrouays

INRA, Unité InfoSol, Avenue de la pomme de pin, BP 20619, Ardon, 45166 Olivet CEDEX, France.

**Auteur correspondantr email:* Christine.Le-Bas@orleans.inra.fr

Introduction

L'utilisation du modèle de culture STICS (Brisson *et al.*, 1998) sur de vastes espaces requiert l'utilisation de bases de données spatialisées sur les sols à petite échelle. Cependant, dans de telles bases de données, les paramètres d'entrée sur les sols nécessaires au modèle sont rarement disponibles. Il faut donc développer des méthodes permettant de transférer l'information contenue dans ces bases de données en information nécessaire au modèle. Ces méthodes de transfert s'appuient sur le concept de fonctions de pédotransfert (Bouma et van Lanen, 1987) qui permettent d'estimer une variable décrivant une propriété du sol à partir d'une relation mathématique, généralement établie statistiquement à partir d'un échantillon d'horizons de sol, utilisant d'autres variables quantitatives descriptives du sol.
Cependant, dans les bases de données spatialisées sur les sols à petite échelle, l'utilisation de fonctions de pédotransfert y est souvent impossible à cause du caractère généralement qualitatif des variables descriptives des sols et de leur faible précision, mais aussi de l'absence de certaines variables. Pour pallier à ce problème, d'autres méthodes de transfert adaptées à ces bases de données ont été développées : les règles de pédotransfert (van Ranst *et al.*, 1995). Ces règles reposent sur l'expertise des pédologues qui, à partir de leur connaissance des sols et de leurs propriétés, proposent des relations entre des caractéristiques des sols disponibles dans les bases de données et leurs propriétés. Ainsi, un certain nombre de règles de pédotransfert a été développé pour les Bases de Données Géographiques des Sols d'Europe ou de France à 1/1 000 000 (Daroussin et King., 1997 ; Le Bas *et al.*, 1997), et notamment pour permettre d'estimer les paramètres d'entrée sols pour le modèle STICS (Donet *et al.*, 2001). Ces règles de pédotransfert ont été révisées pour s'appliquer à la version 5 de STICS dans le cadre d'un projet GICC sur la modélisation intégrée des composantes économiques et biophysiques des productions végétales en relation avec le changement climatique (Godard *et al.*, 2004). Nous présentons ici une synthèse de l'expérience acquise sur ces projets en matière d'estimation des paramètres d'entrée sols pour STICS à partir de règles de pédotransfert.

Matériels et méthodes

La base de données géographique des sols d'Europe à 1/1 000 000 (BDGSE), et sa partie française, la base de données géographique des sols de France à 1/1 000 000 (BDGSF) sont actuellement les seules sources de données cartographiques sur les sols disponibles de manière exhaustive sur l'ensemble du territoire européen ou français (King *et al.*, 1994 ; Jamagne *et al.*, 1995). Ces bases de données fournissent la localisation des principaux types de sol présents sur le territoire européen ou français et cartographiables à une échelle du 1/1 000 000. Elles sont gérées au sein d'un Système d'Information Géographique, et sont constituées de plusieurs éléments : des polygones regroupés au sein d'Unités Cartographiques de Sol (UCS), des types de sol, appelés Unités Typologiques de Sol (UTS), décrits, d'une part, par un ensemble de variables essentiellement qualitatives, et d'autre part, par leur appartenance à une ou plusieurs UCS.
Les paramètres d'entrée sols pour le modèle STICS ne sont pas disponibles directement dans ces bases de données et doivent donc être estimées par des règles de pédotransfert. Deux types de paramètres peuvent être définis :

- les paramètres à valeur fixe : ils correspondent soit à des options inactivées de STICS, soit à des paramètres dont on fixe la valeur délibérément par manque d'information sur le paramètre ou car cela représente une hypothèse plausible pour tous les sols traités ;
- les paramètres à valeur variable : ce sont ceux qui sont estimés à partir de règles de pédotransfert.

Les règles de pédotransfert définies pour la BDGSF ou la BDGSE sont développées de manière à formaliser l'expertise du pédologue formant ainsi une base de connaissance. Cela permet, outre d'avoir une trace écrite des règles, leur répétitivité ainsi que la possibilité de les mettre à jour. Autour de ces règles, un système informatique permettant leur gestion et leur utilisation a également été développé (Daroussin et King, 1997).

La plupart des paramètres à valeur variable sont estimés uniquement à partir de la base de données sols au niveau des UTS. Mais d'autres paramètres nécessitent l'utilisation de données externes comme l'occupation du sol, le climat ou l'altitude. C'est le cas notamment du carbone organique qui varie selon le climat et l'occupation du sol. Ainsi, le Bureau Européen des Sols a réalisé une estimation par règles de pédotransfert du taux de carbone organique sur le territoire européen (Jones *et al.*, 2004). Pour cela, plusieurs couches d'information rastérisées sur une maille de 1 km par 1 km ont été utilisées :

- la base de données géographique des sols d'Europe au 1/1 000 000
- CORINE Land Cover complété par une autre source d'information (indices de végétation issus de traitement d'images satellitales) pour les zones où CORINE Land Cover n'est pas disponible
- un MNT d'une résolution de 1 km
- les données météorologiques interpolées sur une maille de 50 km par 50 km du projet MARS.

Dans le projet GICC cité en introduction, nous avons utilisé le résultat de ce calcul pour en dériver le taux d'azote organique du sol en utilisant des statistiques du C/N disponibles dans la littérature. Cependant, alors que l'ensemble des autres paramètres est estimé au niveau de l'UTS, nous avons là un calcul qui varie au sein de l'UTS selon l'information climatique et l'occupation du sol. L'estimation du taux d'azote organique a donc alors été réalisée non plus au niveau de l'UTS mais au niveau de l'unité de simulation de STICS. Cette unité de simulation résulte du croisement entre le zonage climatique utilisé (correspondant alors au zonage administratif des données du RICA) et les UTS de la base sols. Pour déterminer la valeur de N organique par unité de simulation, nous avons tout d'abord calculé par UCS dans chaque région RICA, la moyenne des teneurs en C organique pour les mailles affectées à l'UCS et dont l'occupation du sol était « terres cultivées ». Nous avons ensuite attribué cette teneur moyenne à toutes les UTS qui composent l'UCS par région RICA. Le résultat de cette estimation est donc par conséquent lié au projet puisque lié au mode de détermination de l'unité de simulation de STICS.

Enfin, il existe une base de données analytique associée à la BDGSE qui fournit un profil représentatif de l'UTS. Ces profils sont de deux types : les profils estimés où normalement toutes les variables sont renseignées mais sous la forme souvent d'estimation, les profils mesurés où les données sont issues d'analyses réelles mais où toutes les variables ne sont pas renseignées et où les méthodes d'analyse varient d'un pays à l'autre. De plus, toutes les UTS ne disposent pas d'un profil représentatif.

Résultats et discussion

Les premiers développements de règles de pédotransfert se sont surtout axés vers l'estimation qualitative de propriétés des sols qui étaient souvent dérivées des variables taxonomiques. La nature qualitative de ces variables estimées était compatible avec la faible précision des

données de la BDGSE. Mais l'utilisation des modèles tel STICS a entraîné une évolution vers des demandes en données quantitatives plutôt que qualitatives, et vers des propriétés des sols pas forcément déterminables à partir de la seule taxonomie. Plusieurs points importants peuvent être soulevés à partir de notre expérience :

- trouver des références : pour établir une règle de pédotransfert, il est alors nécessaire d'avoir une relation entre la propriété à estimer et d'autres caractéristiques du sol disponibles soit directement dans la base de données, soit au travers d'autres règles de pédotransfert, et de pouvoir transformer cette relation en un estimateur quantitatif plus ou moins précis. Lorsqu'il existe déjà des fonctions de pédotransfert, il s'agit alors de voir dans quelle mesure on peut les adapter aux données peu précises de la BDGSE (cas par exemple des propriétés de rétention en eau). Mais, pour certains paramètres de sol, les références sont rares ou concernent des caractéristiques non disponibles (cas de l'albédo par exemple).
- quantifier les variables qualitatives : certaines variables de la BDGSE donnent des informations qualitatives (sous forme de classes, par exemple pour la profondeur du sol), plus ou moins partielles (seulement pour certaines UTS, par exemple pour le taux de cailloux) sur un paramètre. Les règles de pédotransfert ne sont plus alors des estimateurs d'une propriété non disponible mais des estimateurs quantitatifs d'une variable qualitative. Lorsqu'il s'agit de classes, on prend généralement la valeur du milieu de la classe. Mais dans d'autres cas comme pour le taux de cailloux, l'information est plus du type présence/absence. L'utilisation des données de la base analytique peut permettre d'établir des relations entre la présence/absence et d'autres caractéristiques du sol.
- reconstituer un profil « virtuel » : la plupart des modèles sont développés à partir de données ponctuelles. L'utilisation de bases de données spatialisées demande donc de reconstituer une donnée ponctuelle à partir des données caractérisant une surface. On ne prend généralement pas en compte la variabilité interne à l'UTS. L'utilisation de profils représentatifs peut représenter une alternative facile, d'autant que l'on dispose alors de données quantitatives. Outre le fait que la base de données analytique ne dispose pas de suffisamment de profils, se pose le problème de la représentativité réelle de ces profils.
- gérer les données manquantes et les incohérences : les règles de pédotransfert permettent également de corriger certaines incohérences de la base de données ou d'estimer des données manquantes par dires d'expert.
- validation des règles : la validation des règles de pédotransfert est difficile car cela suppose d'avoir des données mesurées sur les propriétés du sol que l'on a estimées. Or dans la base de données analytique, on dispose de peu de données mesurées sur les principales propriétés nécessaires à STICS (rétention en eau, densité apparente, azote organique), voire pas de données du tout (albédo, teneur en eau des cailloux).

Conclusion

Une base de connaissance a été développée pour la base de données géographique des sols d'Europe ou de France à 1/1 000 000 et permet d'estimer un certain nombre de paramètres d'entrée sols pour STICS, permettant ainsi à différents projets de réaliser des simulations à partir de STICS sur de vastes territoires (France, Europe). Mais cela a également permis de fournir ces mêmes paramètres à des projets utilisant d'autres modèles (modèle de croissance forestière, modèle de stockage du carbone organique dans les sols, etc.).

Cependant, d'importants problèmes méthodologiques subsistent quant à l'utilisation des bases de données spatialisées sur les sols. En effet, les problèmes rencontrés par l'utilisation de la base de données géographique des sols de France ou d'Europe à 1/1 000 000 ne sont pas tous

liés à sa faible résolution ni à sa faible précision, et vont aussi se poser lors de l'utilisation de bases de données spatialisées de plus grande échelle. Il s'agit notamment de la prise en compte de la variabilité interne aux unités ainsi que de l'estimation des propriétés des sols qui sont rarement disponibles dans ces bases de données.
Des travaux sur le développement des fonctions de pédotransfert pour l'estimation des propriétés des sols, sur la sensibilité du modèle et de l'impact des erreurs d'estimation ou de la variabilité sur ses simulations, ainsi que le développement de méthodes de spatialisation en lien avec la recherche sur la modélisation spatiale des systèmes sols sont autant de pistes de recherche qui restent encore à développer.

Références

Bouma J., van Lanen J. A. J., 1987 – Transfer functions and threshold values : From soil characteristics to land qualities. In : Beck K. J. *et al.* (eds.) Quantified land evaluation. Proc. Workshop. ISSS et SSSA, Washington D.C., Etats-Unis, 27/04-2/05/1986. Int. Inst. Aerospace Surv. Earth Sci. Publ. n°6. ITC Public. Enschede, Pays-Bas. 106-110.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Dürr 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.

Daroussin J., King D., 1997 – A pedotransfer rules database to interpret the Soil Geographical database of Europe for environmental purposes. In: The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe. Bruand A., Duval O., Wösten H., Lilly A. (eds.). Proceedings of the second workshop of the project 'Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation modeling in environmental studies and in land use planning". Orléans (France), 10-12/10/1996. INRA Orléans, CCR Ispra (Italie). 211 pp.

Donet I., Le Bas C., Ruget F., Rabaud V., 2001. Informations et Suivi Objectif des Prairies. Guide d'utilisation. *AGRESTE, Chiffres et Données*, 134, 55 p.

Godard C., Brisson N., Jayet P.-A., Roger-Estrade J., 2004 - Coupling a generic economic farm-type model and a generic crop model. In : European agriculture in a global context. Jacobsen S.E., Jensen, C.R., Porter J.R. (eds.), European Society for Agronomy Congress;Copenhague (Danemark), 11-15/07/2004, 265-266.

Jamagne M., Hardy R., King D., Bornand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France, *Etude et Gestion des Sols*, 2(3), 153-172.

Jones, R.J.A., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P.J. and Montanarella, L., 2004 - The map of organic carbon in topsoils in Europe, Version 1.2, September 2003: Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.72 (S.P.I.04.72). European Soil Bureau Research Report No.17, EUR 21209 EN, 26pp. and 1 map in ISO B1 format. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

King D., Daroussin J., Tavernier R., 1994 – Development of a soil geographic database from the soil map of the European Communities. *Catena*, 21, 37-56.

Le Bas C., King D., Daroussin J., 1997 - A Tool for Estimating Soil Water Available for Plants Using the 1:1,000,000 Scale Soil Geographical Data Base of Europe. ITC Journal, 3-4.

van Ranst E., Vanmechelen L., Thomasson A. J., Daroussin J., Hollis J. M., Jones R. J. A., Jamagne M., King D., 1995 – Elaboration of an extended knowledge database to interpret the 1:1,000,000 EU soil map for environmental purposes. In: *European Land information systems for agro-environmental monitoring*. King D., Jones R. J. A., Thomasson A. J. (eds.) EUR 16232 EN. Office for the Official Publications of the EC, Luxembourg, 286 pages.

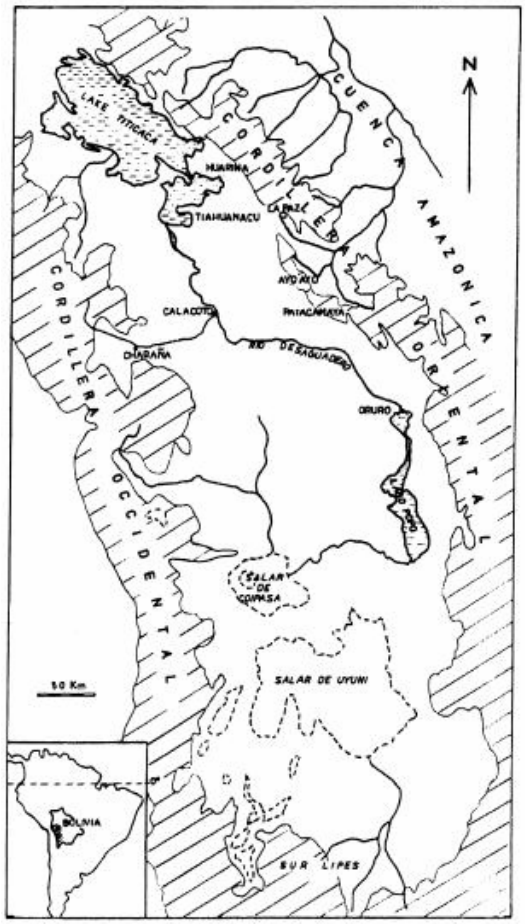
Utilisation du modèle de culture STICS pour comprendre le fonctionnement des systèmes de culture à base de quinoa sur l'altiplano bolivien

Sophie Lebonvallet

IFEA/IRD, UR CLIFA, CP 9214 La Paz, Bolivie - INRA, Unité CSE, Avignon, France

Introduction

L'Altiplano Bolivien (Latitude : 15 à 22°S, Longitude : 65 à 69°W), situé à une altitude allant de 3650 à 4300 mètres, est un vaste plateau de plus de 50 000 km², et constitue l'une des principales régions agricoles de la Bolivie. Cette zone cultivée est délimitée au nord par le lac Titicaca, au sud par le Salar de Uyuni, à l'ouest par la Cordillère Occidentale, et à l'est par la Cordillère Real ou Orientale. Cependant, en raison du climat, les rendements des cultures y sont très variables, et en moyenne faibles, et ce malgré un rayonnement global assez élevé (20 MJ/m^2/jour). En effet, les précipitations faibles et irrégulières (pluviosité annuelle de 200 à 800mm, avec une variabilité interannuelle de 30%), ainsi que les refroidissements radiatifs importants, font que les risques de sécheresse et de gelées pendant le cycle de culture demeurent très élevés et limitent la production. Ainsi, une année sur trois les précipitations pendant la saison agricole sont inférieures à la moitié de la demande climatique (ETP) (Vacher et Imaña, 1987) et la probabilité d'occurrence d'une température inférieure à -2°C pendant les mois de développement des cultures (janvier à mars), pour une température moyenne de 10°C, est souvent supérieure à 40% (Le Tacon *et al.*, 1992). Il existe toutefois un fort gradient climatique du nord au sud de l'altiplano, les zones près du lac Titicaca étant les plus



L'Altiplano Bolivien
(source François et al., 1999)

chaudes et les plus humides (jusqu'à 800 mm), donc les plus cultivées, et celles près du Salar les plus froides et sèches (environ 200 mm), où ne sont présentes que les cultures résistant à ces conditions extrêmes.

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), pseudo-céréale de la famille des Chénopodiacées, est ainsi une des rares cultures rencontrées dans ce milieu en raison de sa tolérance élevée à la sécheresse et au gel. Ses grains ont une qualité alimentaire supérieure à la plupart des céréales grâce à leur teneur élevée en protéines (Tapia *et al.*, 1979), et un important marché d'exportation sur l'Europe et l'Amérique du Nord de quinoas cultivées avec des normes de productions biologiques s'est développé ces 25 dernières années. La demande continue de croître, faisant peser de nombreux doutes sur la durabilité des systèmes de productions orientés sur cette seule plante, car en réponse à cette demande internationale, les agriculteurs passent en effet d'une stratégie de production d'autosubsistance (cultures traditionnelles sur pente avec rotations des parcelles entre 6 et 10 ans) à une culture mécanisée en zone de pampa (rotation de 1 à 4 ans) (Laguna, 2002).

Description technique des systèmes de culture de quinoa sur l'altiplano bolivien

- *Identification des milieux pédoclimatiques et des successions culturales*

Différents milieux pédoclimatiques peuvent être identifiés sur l'Altiplano bolivien du nord au sud :

- Au nord, les zones en bordure du lac, qui se différencient des zones un peu plus éloignées.
- L'Altiplano Central.
- La région InterSalar, avec des zones de plaine, des zones de pente, des zones de bas de pente.

De manière globale, on peut faire correspondre aux zones de l'Altiplano Nord et Central, des successions culturales type orge – pomme de terre – quinoa – jachère variable (1 à 7 ans), et à celle de l'Altiplano Sud des successions de type quinoa – jachère 1 ou 2 ans, ou dans le cas d'une première mise en culture, défrichement de thola – quinoa.

- *Caractérisation des itinéraires techniques*

On va pour cela déterminer d'une part le contexte pédoclimatiques (type de sol et quantité de matière organique, températures et précipitations de chaque zone), et d'autre part le contexte technique (taille des parcelles, présence de mécanisation, filière - biologique, vente, autosubsistance,… -, fourchette de rendements observés dans chaque zone,…).
Les principales différences d'itinéraire technique entre les 2 grandes zones déterminées précédemment (Altiplano Nord et Central / Altiplano Sud) résident dans la préparation du sol et le semis. On a en effet un labour beaucoup plus précoce dans l'Altiplano Sud (mois de février, milieu de la saison des pluies), pour un semis réalisé en poquet au mois de septembre, alors que dans l'Altiplano Central et Nord le labour est effectué entre mars (fin de la saison des pluies) et septembre, et le semis, généralement en ligne, entre septembre et novembre. Pour le reste (fertilisation, irrigation, contrôle des adventices, …), cela dépend plus de la parcelle et de la décision de chaque agriculteur que de la zone considérée.

Questions soulevées par ces différents systèmes

Il ne s'agit ici que de questions, non exhaustives, par grandes fonctions, auxquelles le modèle peut apporter une réponse ; certains aspects, tels que les ravageurs, les maladies ou la grêle, sont donc automatiquement écartés (Brisson *et al.*, 1998, 2002, 2003).

- Influence de l'altitude

Sur la pression atmosphérique, sur les écarts entre températures minimales et maximales, sur le rayonnement net et la fraction d'insolation ?

- Itinéraire technique

- Importance de la préparation du sol : en quoi le labour très précoce dans la zone intersalar peut favoriser l'infiltration et la reconstitution des réserves en eau ? Quelle restitution minérale se fait pendant l'interculture selon le précédent ?
- Intérêt du semis en poquet : création d'un microclimat, favorisation de l'alimentation minérale et hydrique,… ?
- Facteurs limitants l'extension de la culture de quinoa à toutes les zones de végétation naturelle : sensibilité à l'anoxie, problèmes de levée,… ?
- Rôle du mulch naturel : protection contre l'évaporation ?

- Bilans hydrique et azoté, fonctionnement racinaire

- Mécanismes de l'alimentation hydrique alors que P-ETP pendant le cycle de culture est déficitaire : structure en poquet, morphologie aérienne et souterraine, physiologie de la plante, capacité des sols à retenir l'eau,… ?
- Mécanismes de l'alimentation azotée alors que les sols sont assez pauvres en azote et qu'il y a très peu de fertilisation : la forte accumulation dans la plante provient de l'état du sol au semis, de la remobilisation de l'azote des feuilles sénescentes tombées, de la capacité d'absorption de la plante,… ?
- Morphologie racinaire : en quoi sa présence à 2 niveaux (pivot vertical profond, expansion horizontale en superficie du sol) pourrait expliquer les fonctionnements hydriques et azotés ?

- Physiologie et croissance de la plante

- Phénologie de la plante : sensibilité à la photopériode ? origine de la grande variabilité de durée entre semis et levée ?
- Mise en place du feuillage : importance de la rapidité de mise en place et de la durée de vie des feuilles ?
- Croissance et composantes du rendement : efficience d'interception et de conversion ?

Méthodologie de travail

- *Jeux de données disponibles*

Les données plantes proviennent des mesures de développement et de croissance effectuées dans le cadre du Réseau Agronomique Quinoa de l'IRD tout au long du cycle de culture, sur plusieurs sites du nord au sud de l'Altiplano (2 Altiplano Nord - un près du lac l'autre plus éloigné - 1 Altiplano Central, 1 à 2 Altiplano Sud). Ce réseau, débuté en septembre 2003, devrait se prolonger sur 3 ou 4 ans. Des mesures annexes de biomasse et longueur racinaires sont effectuées sur un des 2 sites de l'Altiplano Nord.
Sur chacun des sites, les caractéristiques permanentes des sols sont connues, et un suivi d'humidité est réalisé. Un suivi parallèle est réalisé dans la zone de l'InterSalar pour connaître l'évolution de l'humidité du sol nu entre le labour et le semis.
Des données météo, partielles ou complètes, correspondant aux zones d'étude, sont disponibles en séries de mesures quotidiennes sur plusieurs années. Sur un site de l'Altiplano Nord et sur celui de l'Altiplano Central, des stations météo sont installées pour suivre plus précisément la période du cycle de culture. Sur ce dernier site est de plus installé un appareil de Bowen pour des mesures d'évapotranspiration de la parcelle de quinoa.

- *Mode d'utilisation du modèle sur 2 exemples*

- S'appuyer sur le fonctionnement du modèle en lui-même, voir si les données mesurées correspondent aux simulations : exemple de l'étude de la préparation du sol

Le but est de voir si les résultats obtenus en terme d'eau et d'azote peuvent être expliqués par le modèle. On réalise donc des simulations entre la récolte n-1 et le labour n d'une part, et entre le labour n et le semis n d'autre part. Pour l'eau, on fait varier la date de labour (plus ou

moins précoce pendant la saison des pluies) et on suit l'évolution de l'humidité du sol (sol nu ou couverture de mauvaises herbes), ainsi que l'état d'humidité en septembre au moment du semis. Pour l'azote, on réalise des simulations différentes selon le précédent (par exemple, repos ou pomme de terre), et on suit l'état azoté du sol au semis selon l'enfouissement des résidus, une fertilisation au moment du labour, …

- Borner le modèle par les mesures expérimentales et tester différentes explications de ce qui est observé : exemple de l'étude de l'alimentation azotée

On se place dans ce cas en conditions expérimentales, avec l'ensemble des données Réseau disponible. Le modèle est borné au maximum (forçage du LAI, ajustement des efficiences de conversion pour caler la biomasse aux valeurs observées), pour pouvoir ensuite tester différentes hypothèses, telle que la remobilisation de l'azote des feuilles (voir par exemple l'importance de l'abscission, et la proportionnalité entre le rapport C/N des feuilles mortes et l'inn), ou la capacité d'absorption (ajustement des paramètres de la courbe d'absorption pour la demande,et des paramètres racinaires pour l'offre).

Conclusion

Une telle étude de la quinoa et de ses systèmes de culture par grandes fonctions avec STICS va permettre d'une part de mieux comprendre le fonctionnement de la quinoa et l'adaptation de chaque système et son environnement, d'autre part de faire de la quinoa dans les conditions de l'altiplano bolivien une nouvelle plante du modèle. Cela va de plus pouvoir servir à des études ultérieures de télédétection, de durabilité et d'aide à la décision sur la zone de l'Altiplano Bolivien, plus particulièrement dans la région InterSalar où les enjeux économiques et environnementaux sont les plus importants.

Bibliographie

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

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 simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* **22**, 69–92.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P. 2003. An overview of the crop model. *European Journal of Agronomy* **18**, 309-332.

François, C., Bosseno, R., Vacher, J.J., Seguin, B. 1999. Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology* **95**, 113-137.

Laguna, P. 2002. Competitividad, externalidades e internalidades : un reto para las organizaciones economicas campesinas ; La insercion de la Asociacion Nacional de Productores de Quinua en el mercado mundial de la quinua. *In* "Debate Agrario, Analysis y alternativas", Pérou, Lima, Vol. 34, pp. 95-169.

Le Tacon, P., Vacher, J. J., Eldin, M., Imaña, E. 1992. Los riesgos de heladas en el Altiplano Boliviano. *In* : Morales and Vacher (eds) : *Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos*, Bolivia, La Paz, 4-8/02/1992, pp. 287-291..

Tapia, M. E., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo, A., Mujica, A., Ortiz, R., Otazu, V., Rea, J., Salas, B., Zanabria, E., 1979. "La Quinua y la Kañiwa, cultivos andinos,", pp. 1-228.

Vacher, J.-J., Imaña, E. 1987. "Los riesgos climaticos en el altiplano boliviano," OMM-SENAMHI-Orstom, Bolivia, 30 p.

Les utilitaires divers développés autour de STICS

D.Ripoche[1], M. Launay[1], N. Beaudoin[2]
1: INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
2: INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, Rue F. Christ, 02007 Laon Cedex.
email : domi@avignon.inra.fr

Introduction :

Au cours des différentes utilisations du modèle et dans certains cas particuliers il s'est avéré utile de fournir aux utilisateurs des utilitaires de création ou de transformation de fichiers ou encore de lancement de multi simulations.
Certains de ses utilitaires ont été « généralisés » afin d'élargir leur champs d'utilisation et de permettre leur mise à disposition au plus grand nombre d'utilisateurs du modèle.

Les utilitaires en question :

CREABATUSM60 : Création de procédure de lancement de toutes les USM d'un répertoire
Cet utilitaire permet de générer un fichier .bat permettant de lancer toutes les USM d'un répertoire.
Ces USM peuvent être des USM cultures pures ou cultures associées
Ces USM peuvent être lancées en mode simulation ou en mode analyse de sensibilité ou encore en mode « dépendantes » (simulation de rotation de cultures)
L'exécutable creabatusm60 vous pose des questions permettant de définir le répertoire de travail ou se trouve les USM et leurs fichiers de simulations (tec, sol, climat, etc), le type de simulation souhaité et la version du modèle à lancer.
A partir de ces réponses il génère un fichier batch de lancement des simulations ainsi que les fichiers de travail nécessaires aux simulations (travail.usm et stat.dat).
Les résultats des simulations sont stockés dans les fichiers habituels de sorties des simulations (les bilans, les fichiers journaliers, le rapport).

En aval de cette fonction il existe une fonction Splus **STICS6.fn** qui appelle elle-même le .bat généré par creabatusm60 et qui fournit pour toutes les usm du répertoire des critères statistiques d'estimation de la qualité des simulations ainsi que les graphiques de comparaisons observées/simulées

STICSENSI : lancement de Stics dans le cadre d'une analyse de sensibilité
Cet exécutable est une façon de lancer Stics en faisant varier un jeu de paramètres choisis parmi la liste des paramètres optimisables par Winstics : 10 paramètres simultanément X 10 valeurs.
Les numéros des paramètres et leurs valeurs sont lus dans un fichier (sensi.par) , les données de sorties sont conservées dans le fichier rapport.sti avec la valeur des différents paramètres .
Cet exécutable ne permet de faire l'analyse de sensibilité que sur une seule USM simultanément, creabatusm60 permettra de faire tourner toutes les usm d'un même répertoire en fonction analyse de sensibilité en spécifiant à creabatusm60 le bon exécutable (en l'occurrence sticsensi).

CREAOBS : Création de fichiers « observés » au format Stics à partir de feuilles Excel
A partir d'une feuille Excel contenant l'entête des colonnes l'utilisateur peut saisir les jours ou il a effectivement des observations.
Une fois les données saisies, il enregistre les feuilles en format texte (séparateur tabulation), puis lancer l'exécution de l'utilitaire creaobs.exe
Creaobs génère un seul fichier d'observation à chaque exécution

EXTRACTBILAN60 : traitement des fichiers de sorties du modèle
Cet utilitaire permet de faire les graphes observé/simulé et les calculs statistiques à partir de fichiers s*.sti et .obs de stics (4, 5 ou 6). Il permet aussi de récupérer les stades à partir chaque de b*.sti (pour les cultures annuelles)

PHENO : Calcul les dates de levée de dormance et de floraison
Ce programme calcul 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 ou l'utilisateur est susceptible de faire tourner le même jeux 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 et pour les autres à la demande à l'adresse suivante : stics@avignon.inra.fr

Adaptation du modèle Stics à la vigne au Grand-Duché de Luxembourg : Premiers resultats

E. Weinzaepflen*, B. Tychon
Université de Liège, Département en Sciences et Gestion de l'Environnement,
Campus d'Arlon, 185 avenue de Longwy, 6700 Arlon, Belgique.
** email auteur : eweinzaepflen@ulg.ac.be*

Introduction

Une étude, menée sur deux parcelles de vignes au Grand-Duché de Luxembourg, a pour objectif d'étudier les effets d'apports répétés de compost (mélange de déchets verts et de la fraction organique des déchets ménagers) sur le sol et la vigne (Weinzaepflen, 2001). Cette recherche combine des mesures de terrain et de laboratoire et l'utilisation du modèle STICS (Brisson et al., 2003). L'objectif de ce document est de présenter les adaptations du modèle STICS pour l'estimation des rendements en raisin et des teneurs en eau dans les sols viticoles.

Matériels et méthodes

La parcelle expérimentale est occupée par du Pinot noir (*Vitis vinifera*), conduit en palissage plan verticale « Guyot » double arcure, avec une densité de plantation de 0,5 plants/m².
Concernant le sol, il s'agit d'un sol sablo-argileux, sur toute la profondeur de mesure (0-100 cm).
Différentes données de terrain ont été acquises au cours de la période 1998-2001 sur des micro-parcelles avec et sans compost. Ces données concernent la plante (rendement, vigueur, analyse de la qualité du moût) et les caractéristiques du sol (densité apparente, teneur en matières organiques, etc…). Des mesures de tensions hydriques et du lessivage azoté ont été effectuées à 4 profondeurs du sol (15 cm, 30 cm, 60 cm et 90 cm du sol) à une fréquence hebdomadaire voire bimensuelle sur la période 1998-2001.
L'adaptation du modèle STICS à la vigne est faite en deux étapes : le choix des options relatives à l'écophysiologie et la conduite de la culture puis dans un second temps, l'estimation des paramètres. En effet, la spécificité de la vigne par-rapport aux autres plantes est liée à son mode de conduite qu'il est nécessaire de préciser dans le modèle (date de la taille, date et hauteur du rognage, nombre de fruits enlevés lors de l'éclaircissage, localisation de l'effeuillage, etc…). L'estimation de ces paramètres est faite par des observations in situ, complétées par des données du viticulteur, propriétaire de la parcelle.
L'estimation des paramètres spécifiques de la vigne a été faite soit sur base de références bibliographiques (densité racinaire), de données mesurées ou sur base d'un ajustement graphique (en minimisant l'écart entre les valeurs mesurées et simulées).
Concernant le paramétrage spécifique de la plante, les caractéristiques du cépage Pinot noir établies par Garcia de Cortazar, (2005) ont été intégrées dans le modèle.
La vigne va se développer entre le stade de la dormance (fixée par forçage) et la vendange par cueillette définie lorsque le fruit a atteint une certaine teneur en eau (obtenue par conversion à partir de la teneur en sucre à atteindre).

Résultats

Bien que la recherche soit orientée sur les résultats liés à l'addition de compost sur le sol, (teneurs en eau et en azote du sol), il est nécessaire de vérifier que le paramétrage de la plante soit correct. Les résultats présentés ci-dessous concernent une microparcelle sans addition de compost pour l'année 1998.
Le rendement simulé est de 10,99 t/ha contre 11,3 t/ha mesuré pour une teneur en eau du grain de 79% eau, ce qui correspond à une teneur en sucre du moût mesuré à 79 °Oechsle.
Au niveau des teneurs en eau dans le sol, une analyse de sensibilité est en cours pour déterminer les paramètres les plus sensibles à la variation des teneurs en eau dans le sol. Parmi ces paramètres, on peut suggérer les paramètres liés aux racines dans le sol (répartition dans le profil du sol), à l'évapotranspiration (répartition des zones contribuant à l'évaporation dans le sol, paramètres intervenant sur la transpiration tel que la résistance stomatique).

Conclusions

Etant donné que cette recherche se concentre en priorité sur les effets de l'addition de compost sur le sol et l'environnement, les mesures réalisées ont porté essentiellement sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol au détriment de certaines données liées à la plante, qui n'ont pas été mesurées sur le terrain (profil racinaire, densité foliaire, etc…). Il est évident que ces données pourraient améliorer le paramétrage de la vigne dans le modèle STICS. Il n'empêche que malgré cela, des résultats encourageants d'estimation de rendement ont déjà été obtenus. Des efforts restent cependant à fournir dans l'estimation des facteurs contribuant à l'évolution du bilan hydrique.
Ensuite, l'adaptation du modèle STICS se poursuivra par la paramétrisation des aspects liés à l'azote et notamment la caractérisation du compost. Le calibrage du modèle se fera par comparaison entre les valeurs observées et simulées des concentrations en nitrates de l'eau mobile du sol à différentes profondeurs ainsi que par comparaison de la minéralisation du compost et celle obtenue en laboratoire.

Références bibliographiques

Brisson N., et al., 2003.An overview of the crop model STICS, European Journal of Agronomy, 18, 309-332.

Garcia de Cortazar I., 2005. Communication personnelle

Weinzaepflen E., 2001. Utilisation du compost dans la viticulture luxembourgeoise : effets sur le sol et le développement de la plante, rapport intermédiaire de doctorat, Université de Liège.

Contrôle de STICS à partir de données satellite optique sur blé irrigué en milieu semi-aride

B. Duchemin[1,2], R. Hadria*[2], I. BenHadj[2], G. Boulet[2], G. Dedieu[2], S. Khabba[2], A. Lahrouni[2], B. Mougenot[2]

[1]*CESBIO – 18 avenue. Edouard Belin, bpi 2801,31401 Toulouse cedex , France*
[2]*FSS – Faculté des Sciences Semlalia, BP. 2390, Marrakech, Maroc*
**Corresponding author email: r.hadria@ucam.ac.ma*

Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet "Sud-Med", dont la motivation première est de comprendre le fonctionnement intégré de régions semi-arides et d'établir des scénarii d'évolution des ressources sous les effets combinés de la pression anthropique et de la variabilité climatique. La région pilote du projet est le bassin versant de l'oued Tensift, qui couvre environ 20,000 km² autour de la ville de Marrakech. Les redistributions latérales sont dominantes sur les montagnes (en particulier dans la chaîne de l'Atlas au sud), tandis que les transferts verticaux régissent le bilan hydrique dans la plaine du Haouz où les cultures dominantes sont le blé, l'olive et les agrumes. Le climat en plaine est de type continental aride, caractérisée par une pluviométrie faible et irrégulière (240mm/an en moyenne à Marrakech) et une demande évaporative très élevée (1600 mm/an en se fondant sur le calcul de l'évapotranspiration de référence d'Allen 2000).

Deux instituts publics régionaux (ORMVAH, Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz, ABHT, Agence du Bassin Hydraulique du Tensift) sont chargées de la distribution de l'eau des barrages. L'eau peut également être prélevée dans la nappe par pompage ou puisage. La connaissance des volumes d'eau mobilisés pour l'irrigation est un enjeu fort, dans la mesure où de nombreux forages ne sont pas recensés (entre 40 et 80% selon les sources). L'arboriculture étant prioritaire en terme d'irrigation, la variabilité spatio-temporelle du bilan hydrique est fortement liée aux apports pour les cultures céréalières, qui occupe environ 30% de la surface totale des périmètres irriguées. Une des problématiques critiques pour un développement agricole durable de la région est par conséquent le contrôle du bilan hydrique des principaux périmètres irrigués.

Dans ce contexte, la présente étude porte sur les possibilités de spatialisation du bilan hydrique et végétal de cultures de blé irrigué à partir du modèle STICS (Brisson et al. 1998, 2002, 2003) et de données satellite. Notre objectif est d'identifier la meilleure méthode de contrôle du modèle à partir de l'indice foliaire estimé à partir de données de télédétection optique pour simuler 2 variables cibles (rendement et évapotranspiration), ceci en fonction de la fréquence de passage du satellite.

Données expérimentales

Le site d'étude est un périmètre irrigué de 2800 ha à 40 km à l'est de Marrakech dont les caractéristiques sont adaptés à notre objectif : parcellaire de 3 ha où la culture de blé occupe 60% de la surface totale du périmètre, absence de relief, sol argileux relativement homogène, et irrigation contrôlée par l'ORMVAH. Durant l'année 2003, les bilans de masse et d'énergie (évapotranspiration AET et indice foliaire LAI en particulier) ont été suivis sur plusieurs parcelles de blés dont l'une, étiquetée 'I' dans Duchemin et al. (in press), sert de support à cette étude. Cette parcelle de 4 ha est cultivée en blé dur à cycle court (variété Karim adaptée à la plaine de Marrakech). Elle a été semée le 11 janvier 2003 et irriguée 6 fois le long du cycle de culture, ce qui garantit l'absence de stress hydrique important. L'indice foliaire a été mesuré tous les 10 jours à partir de mesures allométriques ainsi qu'un utilisant une relation avec l'indice de végétation normalisé NDVI. Le rendement a été estimé visuellement à 2 t/ha en fin de saison. La culture souffre probablement d'un stress azoté fort (Hadria et al., soumis à

AJSE) et cette valeur, faible, est en cohérence avec les observations de Karrou (2003) pour l'ensemble du Maroc.

Méthodes de Contrôle de STICS à partir de données de télédétection simulées

Le modèle a tout d'abord été adapté en fonction de données disponibles sur le terrain, qui seront communes à toutes les simulations (Hadria et al., soumis à IJRS). Cette adaptation porte sur le module sol (caractéristiques physico-chimiques et valeurs initiales), l'itinéraire technique, la phénologie de la plante (temps thermique séparant les différents stades végétatifs) et l'utilisation de données météorologiques collectée à proximité de la parcelle d'étude.

La méthodologie d'étude repose sur un schéma comportant trois étapes. En premier lieu, la trajectoire du LAI est contrôlée par les observations terrain par étalonnage ou forçage du modèle STICS. La méthode d'étalonnage consiste à ajuster la vitesse de croissance foliaire (DLAIMAX) qui contrôle l'amplitude de la variation saisonnière du LAI pour minimiser la différence entre valeurs simulées et observées (utilisation du SIMPLEX codé dans WinSTICS 5.0), tandis que le mode forcé consiste à imposer la trajectoire du LAI à STICS, trajectoire préalablement interpolée à partir des observations via un modèle simplifié, développé sur la base du formalisme de Monteith pour la production de biomasse et de la fonction empirique d'allocation feuille/non-feuille proposée par Maas (1993). Dans ce dernier cas, quatre paramètres sont ajustés en utilisant l'algorithme '*Shuffled Complex Evolution Metropolis Algorithm*' (Vrugt et al. 2002). Dans les 2 approches, un paramètre sensible pour le rendement (temps thermique entre l'émergence des plantes et le stade de début de remplissage des grains, respectivement LEV et DRP) est également ajusté. Ces deux approches fournissent chacune des simulations, qualifiées de référence, qui ont été évaluées par rapport aux observations. On note toujours un bon accord entre simulations et observations, que ce soit pour le LAI (RMSE inférieure à 0.23 et efficience supérieure à 0.98), l'évapotranspiration (erreur de 13% en moyenne sur les données journalières) et le rendement (estimé à plus ou moins 2.5% près). Ces résultats confortent une première étude (Rodriguez et al. 2004) portant sur la capacité de STICS à modéliser le fonctionnement du blé en milieu irrigué semi-aride.

Les profils de LAI associés à ces simulations sont dans un deuxième temps convertis en NDVI selon la formule proposée par Duchemin et al. (in press). Ils sont ensuite dégradés pour obtenir des chroniques d'observations satellite en fonction des statistiques d'ennuagement en plaine de Marrakech et en ajoutant une erreur gaussienne de 10% sur le NDVI supposée correspondre à l'incertitude sur les corrections radiométriques (étalonnage des capteurs, bruits atmosphérique et directionnel…). Cette deuxième étape permets d'obtenir des séries temporelles de NDVI dégradé pour quatre scénarii de fréquence d'acquisition, de 1 à 15 jours. La fréquence journalière est autorisée par les capteurs grand champ (AVHRR, MERIS, MODIS, VEGETATION) et certains capteurs à haute résolution présents (ROCSAT, Chern et al. 2001) ou futurs (RHEA, Dedieu et al. 2003). Les fréquences de 10 à 15 jours correspondent aux produits composite des capteurs grand champ ou à ceux issus des missions SPOT ou LANDSAT. Cette deuxième étape est répétée 25 fois pour simuler différent cas d'ennuagement. La différence entre LAI de référence et LAI inversé à partir de ces données de NDVI ainsi dégradées varie de 10 à 25% selon les cas. Les 100 séries temporelles sont finalement ré-utilisées pour contrôler le modèle selon les deux méthodes (étalonnage et forçage) précédemment mises en œuvre. On qualifiera ces dernières simulations de « dégradées », et on les évaluera par rapport aux simulations de références.

Résultats et Discussion

La figure 1 permets de comparer les trajectoires de LAI pour quelques exemples de simulations dégradées. La méthode d'étalonnage de STICS permets de conserver une cohérence presque totale avec la simulation de référence. Pour la méthode de forçage, on

observe en revanche des différences entre simulations dégradées et simulations de références, à la fois en terme d'amplitude et de phase des variations saisonnières de LAI. Ces différences sont une conséquence du plus grand nombre de paramètres ajustés pour restituer la trajectoire du LAI en mode forcé (les 4 paramètres du modèle simplifié), comparativement au mode étalonnage (1 paramètre de STICS, le DLAIMAX).
Les figures 2 et 3 généralisent cette première comparaison à tous les cas de fréquence d'acquisition des données satellite étudiés et pour les variables LAI (fig. 2a), évapotranspiration (AET, fig. 2b) et rendement (fig. 3). Les diagrammes d'erreur en figure 2 permettent de confirmer que la méthode d'étalonnage apparaît plus précise que la méthode de forçage, quelle que soit la variable étudiée (LAI ou AET). Elle apparaît également plus robuste : les erreurs sur l'évapotranspiration n'augmentent que d'environ 1% lorsque l'on passe d'une fréquence d'acquisition journalière à bi-mensuelle. Il est intéressant de noter que globalement, les erreurs sur le LAI sont très nettement supérieures à celles sur l'évapotranspiration, d'un facteur 4 en moyenne. Ceci est due au fait que cette dernière variable est la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration de la plante, termes qui se compensent, au moins partiellement en condition non stressée: une surestimation du LAI entraîne en effet une surestimation de la transpiration accompagnée d'une sous-estimation de l'évaporation, et vice-versa. Les conclusions sont moins nettes en ce qui concernent le rendement (figure 3). Si le rendement est toujours correctement estimé, il n'y a pas de tendance claire en fonction de la fréquence d'acquisition. L'analyse des simulations a fait ressortir qu'une valeur de température critique pour le remplissage des grains, est à l'origine de ce comportement surprenant. Le formalisme utilisé dans STICS v5.0, qui entraîne un arrêt brutal du remplissage du grain au-delà d'une valeur seuil sur la température maximale de la culture, pourrait être amélioré.

Références

Allen, R.G. (2000). *Journal of Hydrology 229: 27–41.*

Brisson, N., et al. (1998). *Agronomie, 18, 311-346.*

Brisson, N., et al. (2002). *Agronomie, 22, 69-92.*

Brisson, N., et al. (2003). *European Journal of Agronomy, 18, 309-332.*

Chehbouni A., al., (2003). *EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice, France.*

Chern, J.-S., et al. (2001). *3rd IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, April 2 - 6, 2001, Berlin, Germany.*

Dedieu, G., et al. (2003). *EGS - AGU - EUG Joint Assembly, 6-11 April 2003, Nice (France).*

Duchemin B., et al. (in press). *Agricultural and Water Management.*

Hadria, R. (submitted). *International Journal of Remote Sensing.*

Hadria, R., et al. (submitted). *Arabian Journal for Science and Engineering.*

Karrou, M. (2003). La conduite du blé au Maroc. *Aux éditions de l'Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc.*

Maas, S.J. (1993). *Agronomy Journal 85: 348-353.*

Rodriguez, J.C., et al. (2004). *Agronomie, 24, 295–304.*

Vrugt, J.A., et al. (2002). *p. 105–112. In Q. Duan et al. (ed.) Calibration of watershed models. Water Science and Application 6. Amer. Geophys. Union, Washington, DC.*

Acknowledgements

Cette étude a été financée par deux programmes Européens INCO-MED du 5ème PCRD : WATERMED (http://www.uv.es/ucg/watermed) et IRRIMED (http://www.irrimed.org/). Les auteurs remercient également le PNTS ainsi que l'initiative ISIS du CNES (http://medias.obs-

mip.fr/isis) pour leur soutien. Les auteurs ont appréciés le concours des institutions publiques régionales chargés de la gestion de l'eau en plaine de Marrakech, et en particulier de l'ORMVAH et de l'ABHT.

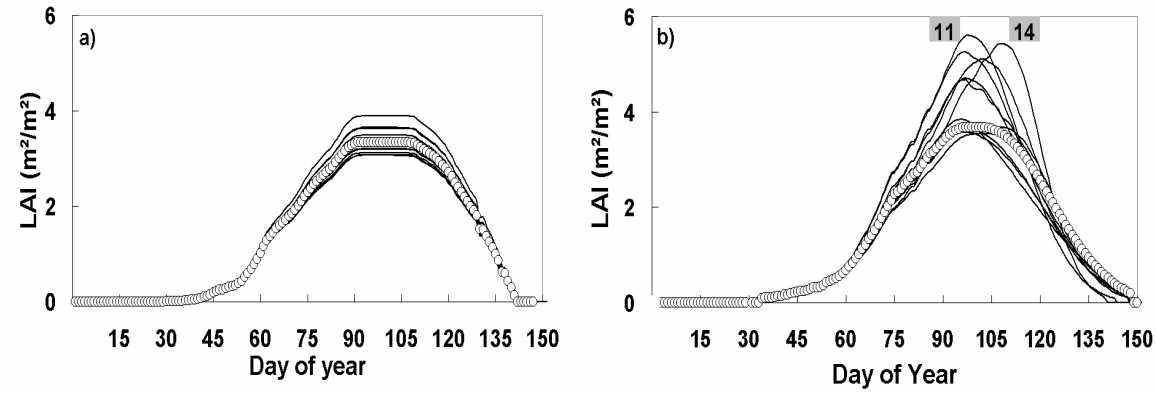


Figure 1. Séries temporelles de LAI associées aux simulations de références (symboles) et aux

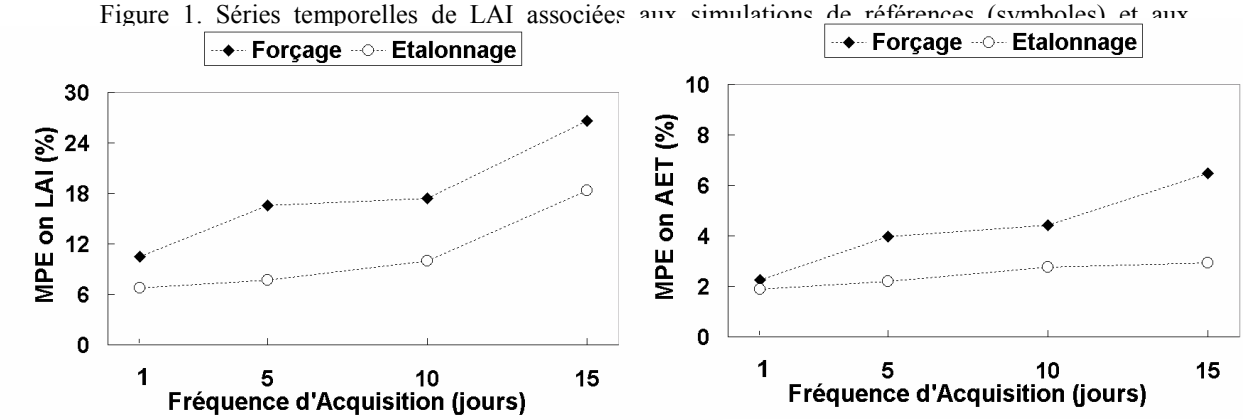


Figure 2. Erreur (MPE=Mean Percentage Error) entre simulation de référence et simulations dégradées pour

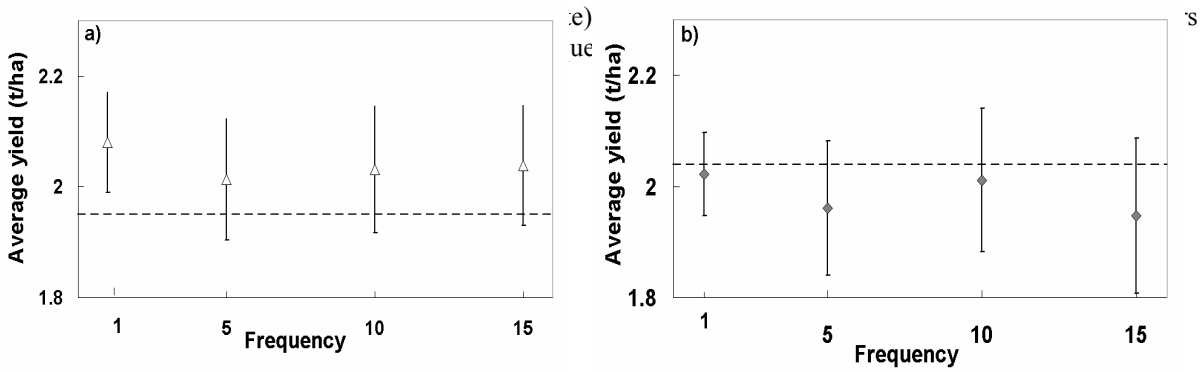


Figure 3. Rendement moyen et écart-type associés aux 25 simulations effectuées pour chaque fréquence d'acquisition des données satellite. Le trait pointillé indique le rendement correspondant à la simulation de référence : a) méthode de forçage, b) méthode d'étalonnage.

3. Le long terme

Animateur table ronde : N. Brisson

Rotations, changements climatiques, devenir de la matière organique, simulation des plantes pérennes.

Long terme : Implication sur la modélisation des rotations
Exemple du projet GICC Seine

E. Sauboua*, B. Mary, N. Brisson*****

* *INRA, unité PSDR, UPMF BP 47, 38040 Grenoble cedex 9 - sauboua@grenoble.inra.fr*
** *INRA, unité d'agronomie de Laon-Reims-Mons, Rue Fernand Christ, 02007 Laon cedex*
*** *INRA, unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9*

Introduction

Le projet GICC-Seine, soutenu par le programme GICC (Gestion et Impact du Changement Climatique) piloté par le MATE, a pour objectif d'étudier l'influence du changement climatique sur la ressource en eau du bassin de la Seine. Il s'intéresse aux aspects hydrologiques du changement climatique mais aussi aux conséquences directes et indirectes des modifications climatiques sur les flux biogéochimiques. Ceci inclut la réponse du système sol-plante en termes de flux d'eau et d'azote, de durée des cycles culturaux et de production agricole. Cette réponse est simulée, à l'aide du modèle STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard), sur un ensemble de situations définies par des rotations et des conditions pédoclimatiques variées.
Nous présenterons ici la modélisation du comportement des systèmes agronomiques sous climat actuel, qui constitue l'état de référence du projet GICC, en insistant sur l'aspect méthodologique et les adaptations nécessaires à l'utilisation du modèle sur de longues périodes.

Matériel et données

Modèle

Nous avons utilisé la version 4 du modèle STICS (Brisson *et al.*, 2003) ; seules seront soulignées ici les caractéristiques qui ont une incidence particulière sur la prise en compte de rotations à long terme. Le modèle fonctionne au pas de temps journalier. Cela génère des temps de calcul non négligeables lorsqu'on fait les simulations sur des grandes échelles de temps (quelques dizaines d'années), ou d'espace.
Le modèle STICS est un modèle de fonctionnement de culture qui simule l'impact du climat, du sol et de la conduite des cultures à la fois sur la production végétale et sur l'environnement. Le modèle a été utilisé pour cette étude dans sa version 4. Pour une description plus détaillée, nous renvoyons à la littérature (Brisson et al., 1998) ; seules seront soulignées ici les caractéristiques qui ont une incidence particulière sur la prise en compte de rotations à long terme.
Le modèle STICS fonctionne au pas de temps journalier : cela implique que les données d'entrée doivent lui être fournies à ce niveau là. Mais surtout, cela génère un coût non négligeable en terme de temps de calcul lorsque la période modélisée dépasse plusieurs années.
Le modèle est conçu à l'origine pour fonctionner à l'échelle de la parcelle. Ce niveau peut être extrapolé à une situation définie par un ensemble de données homogène du point de vue :

- des caractéristiques pédologiques,
- de la chronique climatique,
- des caractéristiques culturales (rotation et pratiques agricoles).

Ces trois types d'entrée ont nécessité la collaboration de plusieurs unités.

Zone d'étude, situations pédoclimatiques

Le bassin de la Seine, dont la surface avoisine 73000 km², ne peut être considéré comme un ensemble homogène en terme d'activité agricole. Cependant, sur la base du pourcentage de surface toujours en herbe et des successions de cultures dominantes (issues de l'enquête Teruti de 1992 à 1998), 12 zones caractéristiques ont été identifiées.
Sur ces différentes zones, les unités de sols, renseignées dans la Base de Données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1 : 10^6, ont été traduites en paramètres de sol nécessaires au fonctionnement du modèle (C. Le Bas, INRA Infosol Orléans). Sur chacune des zones, seuls les 3 sols majoritaires ont été retenus et considérés représentatifs (soit 36 sols au total).
Les données météorologiques journalières sont issues de la base SAFRAN-CROCUS (Météo France, maille régulière de 8 km de côté) après agrégation à l'échelle de chaque zone (Ecole des Mines, UMR Sysiphe). Elles couvrent la période 1971-1991.
Afin de s'affranchir des problèmes d'initialisation et des instabilités dues à la mise en place des rotations (rupture d'assolement), nous avons distingué lors de l'enchaînement des simulation deux phases :

- une période d'initialisation,
- une période considérée comme un régime permanent qui fournira les résultats de l'étude.

Pour conserver la variabilité climatique de la période de référence de 21 ans, les fichiers climatiques de 1971 à 1990 ont été répliqués et enregistrés comme relatifs aux années 1951 à 1970 : cette séquence constitue la phase d'initialisation. Les simulations sont donc enchaînées sur 41 ans (1951-1991) mais seuls les résultats des 21 dernières années seront retenus dans l'interprétation.

Base de données agronomique

La description des successions culturales présentes sur le bassin de la Seine a été réalisée par l'INRA-SAD de Mirecourt :

- Les successions de cultures ont été reconstituées grâce au logiciel CarrotAge qui permet d'extraire des régularités dans les suites d'occupation de sol d'un échantillon constant de points (Mignolet & al., 2003). Les données mobilisées ici sont issues de l'enquête nationale Teruti du SCEES de 1992 à 1998.
- Les itinéraires techniques sont définis à partir des pratiques culturales majoritaires issues de l'enquête du SCEES « Pratiques culturales sur grandes cultures en 2001 ».

Ces informations sont enregistrées dans une base de données dynamique (ACCESS) ; 73 rotations ont été décrites sur l'ensemble du bassin. Dans notre étude, seules les 3 successions majoritaires sur chaque zone ont été prises en compte dans les simulations.

Obtention des fichiers d'entrée et chaîne de calcul

Multiplicité des simulations

Nous avons choisi de modéliser séparément les périodes de culture et d'interculture : l'écriture d'une ligne de résultat à la fin de chaque simulation permet ainsi d'obtenir un état du système à la récolte et au semis. De plus, ceci facilite la simulation de scénarios agricoles alternatifs prenant en compte l'implantation de cultures intermédiaires.
Nous considérons 3 successions culturales sur chacune des 12 zones qui sont appliquées sur 3 types de sol : soit un ensemble de 9 situations pour lesquelles les simulations vont être enchaînées. Les cultures des différentes successions sont enchaînées en boucle sur la séquence climatique de 40 ans, en commençant et en terminant par une USM de sol nu, ce qui correspond à 81 USM enchaînées par séquence climatique, soit 729 pour chaque zone et 8728 au total.

Les itinéraires techniques de chaque culture étant invariant dans le temps et selon le type de sol, « seulement » 260 fichiers techniques sont à définir. Dans ces conditions, l'écriture manuelle des différents fichiers est non seulement fastidieuse mais surtout source de beaucoup d'erreurs de saisie ; il est donc préférable mettre en place une procédure d'automatisation de l'écriture.

Automatisation de l'écriture des fichiers d'entrée

A partir de la base de données ACCESS une extraction a été réalisée en ne retenant que les informations prises en compte dans le modèle :

- pour les travaux du sol : date et profondeur,
- pour les fertilisations (minérale et organique) : date, dose et nature de l'engrais,
- dates de semis et de récolte.

Les dates ont été fixées à la date moyenne de l'intervalle qui est renseigné pour chaque opération dans la base de données, excepté pour la date de récolte (date butoir pour le modèle) pour la quelle la date la plus tardive a été retenue.
Les résultats de cette extraction sont fournis sous la forme d'un fichier texte dans lequel chaque ligne correspond à une succession.
L'écriture des fichiers techniques et USM est ensuite réalisée sur la base d'un fichier modèle, au format adéquat, dans lequel seules les informations ci-dessus sont ré-écrites à partir du fichier des extractions. Lors de cette étape, de nombreux tests doivent être réalisés pour placer correctement les différentes opérations soit dans le fichier technique de la culture, soit dans celui de l'interculture précédente selon leur date. Certains paramètres, tels que l'efficacité de l'engrais selon sa nature ou les caractéristiques des engrais organiques, les profondeurs et densité de semis selon les cultures, etc., doivent également être prédéfinis

Schéma de modélisation

Pour chaque zone, ont ainsi été constitués un ensemble de fichiers techniques ainsi qu'un fichier USM de 729 lignes correspondant aux (3x3x81) USM. Le programme STICS est alors exécuté par l'intermédiaire d'un programme batch sur des blocs de 81 USM enchaînés. Il en résulte un fichier rapport de 729 lignes.
Un programme de post-traitement de ce rapport est ensuite exécuté, qui néglige les 41 premières lignes de chaque bloc (correspondant à la période d'initialisation) puis agrége les lignes suivantes 2 à 2 afin d'obtenir une seule ligne pour chaque binôme [culture ; interculture suivante].

Illustration des résultats

La figure 1 illustre l'importance de la phase d'initialisation constituée des 20 premières années de simulation : l'évolution du stock d'humus dans le sol montre une variation rapide au cours des premières années puis atteint un plateau plus stable.

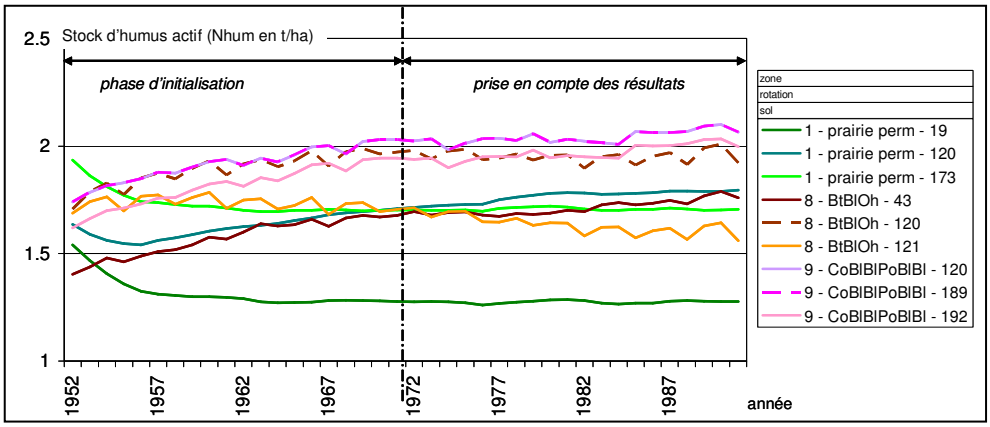


figure 1 : *Evolution au cours du temps du pool d'humus actif au cours de trois successions culturales modélisées sur les 3 sols des zones concernées*

La figure 2 montre que les résultats des modélisations sont, en terme de rendement, assez proches de ce qui est observé sur le bassin de la zone. Compte tenu des différences entre les protocoles d'acquisition des données (statistiques agricoles à l'échelle de la PRA) et de simulation, ceci indique que la capacité prédictive du modèle est satisfaisante et que les choix méthodologiques sont pertinents.

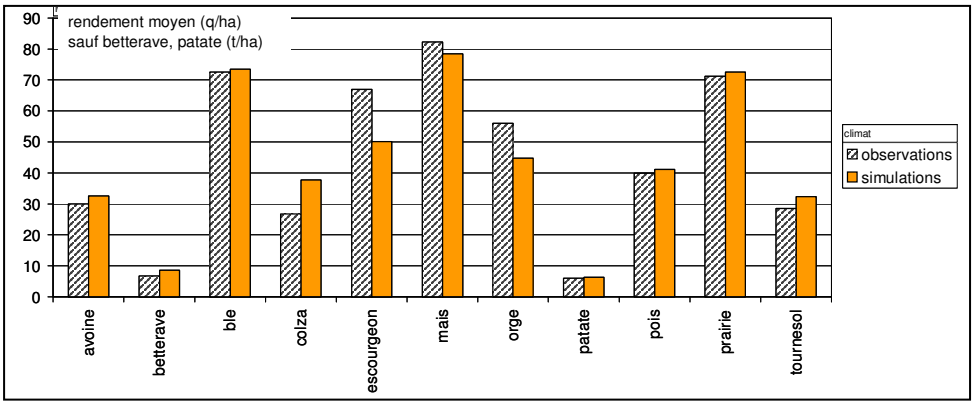


figure 2 : *Comparaison des rendements moyens simulés et des rendements des statistiques agricoles (observations) sur l'ensemble des successions des 12 zones*

Conclusions

La modélisation de successions culturales sur le long terme dans le cadre du projet GICC-Seine a nécessité un lourd travail d'acquisition des informations qui ne peut se faire sans la collaboration de plusieurs équipes (INRA-SAD Mirecourt pour les données agricoles, INRA-Infosol Orléans pour les données pédologiques, Ecole des Mines et UMR Sysiphe pour les données climatiques).

Le traitement de ces données pour la constitution des fichiers d'entrée constitue une étape clé. L'écriture automatique des fichiers d'entrée, même si elle semble coûteuse en terme de développement et donc de temps au départ, est préférable : alors que les erreurs qui peuvent être générées lors de cette phase sont aléatoires dans le cas d'une méthode manuelle, elles sont systématiques lors d'une procédure automatique et donc plus faciles à identifier et à corriger. De plus, en cas de modification des données originelles (mise à jour de la base de données, définitions de scénarios alternatifs, …), l'automatisation permet de régénérer un jeu de fichiers beaucoup plus facilement.

Enfin, le protocole de simulation des différents enchaînements et le traitement des résultats obtenus demande également un travail de développement informatique du fait du grand nombre de calculs effectués.

Les résultats obtenus lors de cette étude nous montre que la méthodologie mise en place est satisfaisante pour la modélisation de longues successions culturales à l'aide du modèle STICS.

Références

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud 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 balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie,* 18, p. 311-346.

Ducharne A., Théry S., Billen G., Beaudoin N., Benoit M., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Mermet L., X. Poux , Sauboua E., Schott C., Viennot P., Abu Alkhair A., Baubion C., Curie F., Ducos G., Gomez E., Lebonvallet S., Olive G., Sicart J.E. (2004). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine.

Rapport final du projet GICC-Seine, 60 p.

Mignolet C., Schott C., Mari J.-F., Benoit M. (2003). Typologie des successions de cultures et des techniques culturales dans le bassin de la Seine. *Rapport d'activité 2002 du Programme PIREN-Seine*, 23 p.

Mignolet C., Schott C., Benoit M. (2004). Dynamique des pratiques agricoles, *Rapport d'activité 2003 du programme PIREN-Seine*, 19 p.

Impact des changements climatiques : Un modèle sur la vigne

Iñaki García de Cortázar Atauri, Nadine Brisson, Bernard Seguin
Unite Climat Sol Environement, INRA, Site Agroparc, domaine St-Paul, F-84914, Avignon cedex 9, France.
E_mail : igarcia@avignon.inra.fr

Les perspectives d'évolution du climat, à cause de l'émission de gaz à effet de serre d'origine anthropique, ont des conséquences sur l'évolution probable des productions agricoles (IPCC 2001, Perarnaud et al. 2003). Les impacts attendus sur la vigne sont ceux généralement attendus sur les systèmes à couverts végétaux pérennes (Seguin et Garcia de Cortázar, 2004). Comme en écho à ce réchauffement, les manifestations phénologiques des cultures pérennes ont été plus précoces, qu'il s'agisse des dates de floraison (avancée de l'ordre de deux à trois semaines en trente ans, aussi bien pour la vigne que pour les arbres fruitiers), ou des dates de vendange qui ont avancé de presque un mois en cinquante ans, aussi bien dans le Médoc que dans les Côtes-du-Rhône (Ganichot 2002), sans que cela puisse s'expliquer par les pratiques culturales. Des autres études montrent une tendance claire à approcher, sinon dépasser, les limites d'adaptation des cépages aux zones climatiques, ce qui nous interpelle sur le possible déplacement des aires actuelles de répartition des cépages (Schultz, 2000, Seguin et Garcia de Cortázar, 2004). Si l'on peut prévoir que les modifications majeures vont concerner la phénologie, le bilan carboné et le bilan d'eau, il y a aussi des éléments plus subtils tels que le risque que peut représenter pour la qualité du vin en milieu méditerranéen l'avancée de la maturation vers les périodes plus chaudes de l'été (Lebon 2002). 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, tel que le modèle STICS-Vigne, pouvant être forcé par des variables d'entrée provenant de scénarios climatiques produits par les modèles globaux.

Le modèle STICS-Vigne

Les modèles de cultures, qui se sont développés depuis une vingtaine d'années offrent un cadre conceptuel permettant de calculer les éléments de production comme résultant des interactions dynamiques entre la plante, le sol, le climat et les techniques culturales à l'échelle parcellaire. Cependant l'essentiel des efforts de modélisation s'est fait sur les grandes cultures (Brisson et al., 1998, 2002b) et peu de choses existent sur la vigne (Bindi et al., 1996 a et b). La vigne est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne (rameaux, feuilles et grappes) et sa teneur en azote, l'indice foliaire ainsi que le nombre de baies, leur biomasse et leur teneur en sucre. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune de ces couches étant caractérisée par sa réserve en eau, en azote minéral et organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol. La croissance de la culture est réalisée par l'interception du rayonnement solaire par le feuillage (par le transfert radiatif) puis transformation en biomasse aérienne qui est orientée préférentiellement vers les baies à partir de la nouaison. Le bilan azoté de la culture est simulé parallèlement au bilan de carbone, dont il dépend en partie. L'existence éventuelle de stress hydrique et azoté est prise en compte au travers d'indices, calculés dans les bilans hydrique et azoté, qui peuvent réduire la croissance foliaire et l'accumulation de biomasse en conditions d'alimentation limitante. La vigne est une culture indéterminée, c'est-à-dire que la compétition trophique entre les feuilles et les baies est un élément moteur de la production de la culture et de sa conduite. La teneur en CO_2 de l'atmosphère agit à la fois sur l'efficience de conversion de l'énergie solaire en biomasse (augmentation avec le taux de CO_2) et sur la transpiration (réduction de la conductance stomatique et donc de la transpiration avec l'augmentation du CO_2). Le débourrement est calculé à partir de l'intégration du modèle BRIN (Garcia de Cortázar et al., 2004) qui calcule la date du débourrement (stade C de Baggiolini) à partir de la combinaison du modèle de Bidabe (une somme d'actions froid) et du modèle de Richardson (somme de températures

horaires). Les autres stades phénologiques (floraison, véraison, récolte) sont calculés à partir du principe de sommes de degrés-jours en base 10 (température base déterminée pour la vigne). La teneur en sucre du raisin est décomposée en deux variables calculées indépendamment : la teneur en sucre de la masse sèche d'une part et la teneur en eau du raisin d'autre part. Les variables d'intérêt pour notre étude, simulées à l'aide du modèle concernent : A) **la phénologie** : levée de dormance, débourrement, floraison, véraison et récolte ; B) **le bilan de carbone de la plante** : biomasse totale et indice foliaire à la récolte ; C) **la vendange** : matière fraîche et sèche des fruits récoltés et leur teneur en sucre ; D) **les réserves.**
La version du paramétrage utilisée pour cette étude est essentiellement générique. La spécificité des cépages n'intervient que sur la phénologie et la taille potentielle des baies.

Choix des situations viticoles et protocoles de simulation

Nous avons choisi deux régions très différentes, le département du Vaucluse (84) pour représenter l'AOC Côtes du Rhône Méridionales et le département de la Marne (51) pour représenter l'AOC Champagne. Les cépages utilisés son Grenache (CRM) et Pinot Noir (Champagne). Les itinéraires techniques sont typiques de chaque région et les parcelles sont supposées non enherbées, non fertilisées et bien contrôlées en ce qui concerne les adventices et maladies. Le premier rognage est simulé à la floraison et les rognages successifs sont réalisés en fonction de la croissance du feuillage ainsi contrôlée. Ni éclaircissage, ni effeuillage sont supposés être pratiqués mais la charge laissée est différente selon la région et le type de conduite : 15 grappes dans le cas du Grenache en CRM et 20 grappes dans le cas de Champagne. La taille est réalisée à la fin de l'année. Les sols choisis sont aussi représentatifs de chaque région : pour CRM, une terrasse ancienne du Rhône, sol caillouteux avec une texture limoneuse-sableuse ; pour la région du Champagne, un sol à bonne perméabilité avec une texture sablo-argileuse, moyennement calcaire et apparition de la craie à 60 cm du profondeur.
Les données climatiques utilisées pour ce travail sont issues des simulations réalisées avec le modèle ARPEGE-Climat, modèle de circulation générale construit à partir du modèle de prévision opérationnelle de Météo-France. Les séries des années simulées correspondent aux périodes « passées » (1960-1989) et « futures » (2070-2099). La série des années entre 1960-1989 correspond au climat qui prévalait avant que se manifestent les premiers signes du réchauffement climatique. La période des années entre 2070-2099 prend en compte les concentrations annuelles des principaux gaz à effet de serre prévues par le scénario SRES-B2 du GIEC (IPCC, 2001). Ce scénario fait l'hypothèse d'un accroissement modéré, dans lequel la concentration de gaz carbonique atteint le double de sa concentration préindustrielle à la fin du XXI siècle (610 ppm de CO_2), avec comme conséquences directes : une augmentation de la température de 2.6°C, une augmentation des pluies hivernales et printanières et une diminution des pluies estivales provoquant une augmentation des déficits hydriques pendant la saison de végétation de la vigne. Nous avons décidé de travailler directement avec les deux séries simulées, afin de préserver la logique physique entre les variables du climat.

Résultats

a) LA PHENOLOGIE

La vendange est supposée intervenir à une valeur prescrite de teneur en eau des baies. Cette valeur a été fixée à 77% pour CRM et 80 % pour la Champagne. Certaines années, les conditions climatiques ne permettent pas d'atteindre ces valeurs ; dans ces cas, une date butoir de vendange est imposée au 10 octobre pour les CRM et au 30 octobre en Champagne. Les simulations du modèle montrent que le réchauffement climatique provoque un

raccourcissement du cycle et une avancée de tous les stades phénologiques sauf la levée de dormance. Il semble que le raccourcissement des phases phénologiques (Tableau 1) concerne surtout la phase levée de dormance-débourrement et la phase floraison-véraison. Cette dernière est particulièrement importante en Champagne (40 jours en moyenne contre 30 dans les CRM). De plus, la variabilité interannuelle de ces résultats est toujours plus faible pour le scénario futur. Ces résultats confirment et complètent ceux annoncés par Lebon (2002) et Seguin et Garcia de Cortázar (2004).

	Différence Fut-Pas	Différence Fut-Pas
Levée de dormance	+9 jours	+13 jours
Débourrement	-21 jours	-21 jours
Floraison	-20 jours	-19 jours
Véraison	-29 jours	-41 jours
Récolte	-30 jours	-41 jours

b) LE BILAN DE CARBONE DE LA PLANTE

Pour étudier l'évolution du cycle du carbone, nous avons simulé la matière sèche totale et l'indice foliaire (LAI) à la récolte.

	CRM passée	CRM future	Différence Fut-Pas	Champagne passée	Champagne future	Différence Fut-Pas
Biomasse sèche totale (t/ha)	6.55 ± 0.68	6.24 ± 0.9	**-0.31**	6.57 ± 0.7	6.60 ± 1.06	**0.03**
LAI	0.83 ± 0.46	1.52 ± 0.34	**0.69**	1.24 ± 0.56	1.52 ± 0.56	**0.28**

Nous observons, une perte de biomasse sèche totale dans les CRM, et une absence de modification en Champagne. Ces résultats qui semblent contradictoires avec la stimulation de la photosynthèse par l'augmentation du CO_2, s'expliquent par plusieurs raisons :

- un **raccourcissement** du **cycle** de la **vigne**. L'analyse de la phénologie nous a déjà montré auparavant qu'il existe un raccourcissement du cycle très important, qui diminue la période pendant laquelle la plante intercepte du rayonnement et fabrique de la biomasse.
- **l'augmentation** de la **température**. L'optimum thermique journalier pour la photosynthèse se situe entre 18 et 23 °C, en-deçà et au-delà de ces seuils la photosynthèse est réduite. Or le scénario climatique futur correspond à une augmentation de la température moyenne de 2°C entre la floraison et la véraison. En CRM il est probable que cette augmentation provoque des situations supra-optimales pour la photosynthèse et donc défavorables à l'accumulation de biomasse. Au contraire, en Champagne, région où la photosynthèse est actuellement le plus souvent sub-optimale, cette augmentation permet d'accroître les périodes de fonctionnement optimal.
- **l'augmentation des stress**. La mise en place plus rapide de l'indice foliaire combinée à la diminution des précipitations estivales peut créer des situations de déficit hydrique supplémentaires ou des intensités plus grandes des déficits actuels. Nous observons un accroissement de l'indice foliaire à la récolte dans les deux régions, facteur qui joue un rôle important sur la production tant en quantité qu'en qualité (Riou, 1994). Compte-tenu de la compétition feuilles/fruits, cette croissance végétative supplémentaire peut se faire au détriment des fruits. Tel n'est pas le cas dans nos situations simulées car nous avons introduit le rognage dans les deux régions d'étude. Cela met toutefois en lumière la nécessaire prise en compte des techniques culturales dans ce genre d'étude d'impact.

c) LA VENDANGE

Nous avons étudié le rendement (en matière fraîche et matière sèche) et la quantité de sucre accumulé dans les baies à la récolte, dont la date est déterminée par la teneur en eau des baies. La tendance représentée par l'évolution entre les deux séries climatiques, « passée » et « future », semble assez réaliste. Elle montre par exemple que dans le cas de la série

« passée », 1 année sur 4 (résultats en dynamique non illustrés dans ce papier) le raisin n'atteint pas la maturité requise à la vendange pour la période « actuelle », ou que la notion de maturité a changé. Cette proportion correspond également à des vendanges déclenchées en fonction de contraintes climatiques (pluies, baisses températures…) ou sanitaires (mildiou, botrytis…). Pour la période « future », le modèle estime que l'accumulation de sucre dans les baies sera suffisante, tous les ans, pour déclencher la vendange sur des critères physiologiques. La diminution du rendement dans la région des CRM est liée à la difficulté de la plante à remplir ses fruits, à cause du raccourcissement de la période entre la floraison et la récolte (dix jours en moyenne) et des fortes températures entre la floraison et la véraison. De plus, la possibilité de vendanger toutes les années à un optimum de qualité (77% d'eau dans les baies correspondant à 13°-14° dans le cas des CRM) génère une perte de rendement et une augmentation de la concentration en sucre. L'adoucissement du climat dans la région du Champagne, même s'il crée un raccourcissement de la période de remplissage, ne provoque pas de perte de rendement en matière sèche à cause sans doute de l'effet photosynthétique, qui ici est suffisant pour compenser l'impact phénologique.

	CRM passé	CRM futur	Différence Fut-Pas	Champagne passé	Champagne futur	Différence Fut-Pas
Rendement (t/ha)	13.65 ± 3.5	10.24 ± 2.59	**-3.65**	18.54 ± 6.5	15.7 ± 4.25	**-2.84**
Biomasse sèche des fruits (t/ha)	3 ± 0.46	2.39 ± 0.61	**-0.61**	3.15 ± 0.6	3.18 ± 0.86	**0.03**
Sucre (g/l)	195 ± 8	219 ± 0	**24**	168 ± 8	194 ± 1	**26**

d) LES RESERVES

Le rôle des réserves de la plante est fondamental dans la reprise de végétation au printemps. Après le débourrement, la jeune tige se développe et forme les jeunes feuilles qui vont tout d'abord constituer des puits d'utilisation des réserves carbonées. Le modèle montre une forte augmentation des réserves dans la région des CRM. L'adoucissement du climat à l'automne et l'avancement de la période des vendanges peuvent être la cause de cette augmentation des réserves. Par contre, dans la région de Champagne, le modèle simule des quantités des réserves très faibles. La sévérité du climat automno-hivernal dans la région ne facilite pas leur accumulation. Par contre, nous observons une augmentation (faible) de l'accumulation des réserves dans le futur grâce à l'adoucissement de la température.

	CRM passé	CRM futur	Différence Fut-Pas	Champagne passé	Champagne futur	Différence Fut-Pas
Réserves (t/ha)	1.76 ± 0.53	2.45 ± 0.71	**0.69**	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.11	**0.04**

Conclusion

Ce travail a permis de réaliser une première approche des possibles impacts du changement climatique, à l'aide du modèle STICS-vigne. Les résultats obtenus sont très variés. Dans certains cas, nous observons une confirmation des hypothèses déjà exprimées dans d'autres travaux : avancement du cycle de la vigne, raccourcissement de la période entre la floraison et la récolte, amélioration de la qualité de la récolte (toujours en assimilant qualité de la récolte à l'accumulation de sucre). Cependant, de nouvelles questions apparaissent quant à la gestion de la surface foliaire et sa concurrence avec le rendement ou quant à la gestion des réserves d'une année sur l'autre. Au-delà du constat des impacts, l'objectif est d'analyser la capacité d'adaptation de différents cépages et des techniques culturales aux possibles modifications du climat.

BIBLIOGRAPHIE

Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S. and Miglietta, F. 1996a. The effect of elevated CO_2 concentration on grapevine growth under field conditions. Acta Hort. 427: 325-330.

Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S. and Miglietta, F. 1996b. Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. Climate Res. 7 : 213-224.

Brisson N., Mary B.,Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Baret 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 balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18, 311-346

Brisson, N., Gaudillère, J.P., Ramel, J.P. and Vaudour, E. 2002b. Utilisation du modèle de culture STICS pour renseigner les zonages viticoles. IVe symposium sur le zonage vitivinicole. Avignon, Juin. CD edited by OIV.

Ganichot, B. 2002. Evolution de la date des vendanges dans les Côtes-du-Rhône méridionales. 6émes Rencontres Rhodaniennes. Ed. Institut Rhodanien. Orange, France. p. 38-41.

Garcia de Cortazar Atauri I., Brisson N., Seguin B., Gaudillere J.P. et Baculat B. 2004. Simulations of Bud Break dates. BRIN model. 7th Int. Symp. of vineyard physiology and biotechnology. 21-25 juin Davis (USA)

IPCC. 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.

Lebon, E. 2002. Changements climatiques : quelles conséquences prévisibles sur la viticulture ? 6émes Rencontres Rhodaniennes. Ed. Institut Rhodanien. Orange, France. p. 31-36.

Perarnaud, V., Seguin, B., Malezieux, E., Déqué, M. and Loustau, D. 2004. Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry adapt to 21st century climate change. WMO Int. Workshop on Reducing Vulnerability of Agriculture and Forestry to Climate Variability and Climate Change. Ljubljana, Slovénie, 7-9 oct. To appear in Climatic change.

Planton S. 2003. A l'échelle des continents : le regard des modèles. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris. Tome 335, N°6-7, 535-543

Riou C. (1994) Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté Européenne. CEE Bruxelles, rapport EUR 15863 FR/EN, 321 pp.

Schultz, H.B. 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.

Seguin B. et Garcia de Cortázar Atauri I. 2004. Climate warning : consequences for viticulture and the notion of "terroirs" in Europe. 7th Int. Symp. of vineyard physiology and biotechnology. 21-25 juin Davis (USA). Soumis à Acta Horticulturae.

Utilisation des scenarios de changement climatique dans un modèle de culture

Nadine Brisson [(1)], Michel Déqué [(2)], Raul Diaz[(3)], Agnès Ducharne[(4)], Stéphanie Juin[(1)], Sophie Lebonvallet [(5)]

[(1)] *INRA, Unité CSE, Avignon,* [(2)] CNRM Toulouse, [(3)]*INTA, Castelar Argentine,* [(4)] *UMR Sysiphe Jussieu-Paris,* [(5)] *IRD Bolivie*

L'augmentation de la température depuis le fin du XIXème siècle est un fait avéré (estimation de 0.3 à 0.6°C en moyenne globale : rapport GIEC, 2001) et la décennie 1990 a connu le réchauffement le plus important de ce siècle. L'origine anthropique de ce réchauffement est plus que probable et l'inertie du système climatique à l'échelle globale aboutit à des estimations minimales de l'ordre de +1.5°C pour la fin du XXIème siècle. Les impacts de ce réchauffement apparaissent déjà dans divers domaines de l'agriculture (Seguin et Stengel, 2002). Compte tenu de l'aptitude des modèles de culture à reproduire l'impact possible de cette évolution du climat, ils apparaissent comme des outils privilégiés pour mener des études prospectives sur l'impact du changement climatique en agriculture.

Ces études utilisent des données climatiques issues des modèles climatiques. En effet les modélisateurs du climat réalisent des simulations du climat futur à partir des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols proposés par les experts internationaux (scénarios SRES décrits dans les rapports du GIEC[3]). Ces simulations sont issues de plusieurs modèles couplés, à résolutions variables (atmosphérique, océanique, banquise) qui permettent de faire les forçages radiatifs et de température de l'océan requis. Les deux laboratoires français disposant de ces outils sont le LMD (CNRS) et le CNRM (Météo - France). En ce qui concerne le CNRM, des progrès récents en terme de résolution spatiale (50 x 50 km^2 alors que le modèle LMD est à 250 x 250 km^2) ont été réalisés grâce à l'utilisation d'un modèle régionalisé analogue au modèle utilisé pour la prévision. Jusqu'à présent, la validation de ces modèles à partir de séries climatiques réelles (en les faisant tourner avec des forçages « actuels ») présentait des biais importants. Cela conduisait les utilisateurs à appliquer la méthode des « anomalies » en extrayant des comparaisons simulations futures/actuelles les écarts sur les variables climatiques mensuelles (ou les rapports selon les variables) et en les appliquent à des séries réelles. Cette méthode sera illustrée dans une première partie. La meilleure résolution spatiale du modèle du CNRM (Arpège Climat) nous autorise à utiliser directement les sorties du modèle. Dans ce cas (seconde partie de ce poster), nous verrons comment juger de la fiabilité de ces scénarios par rapport aux études envisagées. Quelle que soit la méthode envisagée on dispose toujours de deux séries simulées : une série dite « actuelle » (on devrait plutôt la qualifiée de « passée ») correspondant à un forçage radiatif de la période précédent le changement climatique (généralement 1960-1989) et une série « future » correspondant (cas des dernières simulations du modèle A-C, les plus utilisées dans la communauté) à un forçage radiatif équivalent à 660 ppm [CO2] (scénario SRES B2) ou 800 ppm [CO2] (scénario A2).

Les méthodes des anomalies

[3] GIEC : groupe d'experts internationaux sur le changement climatique qui produit un rapport tous les 4 ans, le dernier datant de 2001.

Elles nécessitent de disposer de séries de données réellement observées qui servent de base à l'application des anomalies. Les données simulées sont toujours utilisées en relatif.

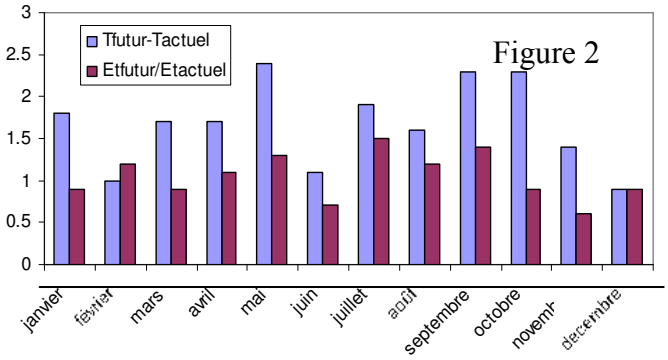
- **Méthode des anomalies appliquées directement**

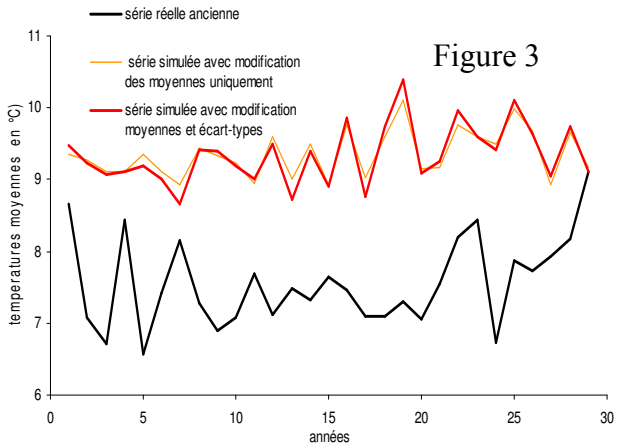
Pour chaque variable climatique d'intérêt (températures mini et maxi, rayonnement, pluviométrie, humidité et vent) on extrait des données simulées (actuelles et futures) des moyennes mensuelles, puis on en fait le rapport futur/actuel. Ce sont ces rapports mensuels qui sont ensuite appliqués à aux données réelles. Cette méthode a été appliquée dans le cadre du projet GICC-Seine pour étudier l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine (Ducharme et al., 2004). Les anomalies moyennes pour l'ensemble du bassin sont données dans le tableau ci-dessus. Cette méthode présente l'inconvénient de d'altérer la cohérence physique entre les variables climatiques. Pour la pluviométrie, elle ne peut jouer que sur la quantité et non sur le nombre de jours de pluie. Elle conserve également la variabilité intra-mensuelle d'origine. En revanche elle permet de « sécuriser » l'étude car les modèles climatiques, ainsi que leurs paramétrages des processus physiques, sont sujets à de nombreuses incertitudes, dont l'évaluation est problématique (Planton, 1999), et qui, de plus, augmentent à l'échelle régionale (e.g. Kittel et al., 1998).

Simulations « CC »	**B2**	**A2**
Δ Précipitation	+2%	+12%
Δ Température	+2.5°C	+3.4°C
Δ Hum. Air	+12%	+13%
Δ Rayonnement IR	+4%	+5%

- **Méthode des anomalies appliquées dans un générateur climatique**

Avec cette méthode, les anomalies ne sont pas appliquées directement aux grandeurs physiques mais à leurs distributions statistiques. Dans ce cas, ce sont à la fois les valeurs moyennes et leurs variabilités qui peuvent être modifiées. La figure 2 montre les anomalies des températures moyennes (en différence) et des écart-types (en rapport) extraites des sorties du modèle du LMD sur un pixel correspondant au sud-est de la France (Juin et al., 2004). On observe que la variabilité future, prédite par le modèle est plutôt plus faible en hiver et plus élevée en été. Ces anomalies ont été introduites dans le générateur climatique LARS-WG (Semenov et al., 1998) qui est un modèle stochastique ayant pour but de calculer des séries journalières de température, précipitations et rayonnement à partir de séries observées. Il est capable de prendre en compte des modifications sur les moyennes et les écart-types des variables climatiques observées. La fiabilité des résultats (pour une utilisation sans modification des moyennes et écart-types) est estimée par des tests statistiques (Fischer et Student). La figure 3 représente les séries ainsi simulées en comparaison avec la série réelle, même s'il n'est pas possible de faire une





comparaison année par année en lien avec le caractère stochastique de la méthode : LARS-WG simule une série d'années climatiques sans logique de succession temporelle.

Les méthodes directes

Il s'agit d'utiliser directement les sorties des modèles climatiques sans passer par une série observée. Elle permet de garder la cohérence physique entre les variables climatiques mais elle est associée à la résolution spatiale du modèle climatique (au mieux 50 x 50 km^2) de type synoptique. Dans ce cas il est nécessaire, par une étude préalable, de s'assurer de la fiabilité des scénarios.

- **Fiabilité climatique**

Une méthode consiste, variable par variable, à réaliser des tests statistiques d'égalité des moyennes à l'échelle mensuelle ou annuelle entre observation et simulation. Ces tests sont souvent décevants pour la pluviométrie comme dans l'exemple de la Figure 4, où la différence entre les deux séries actuelle et future n'est pas significative alors qu'elle l'est entre les deux séries actuelles.

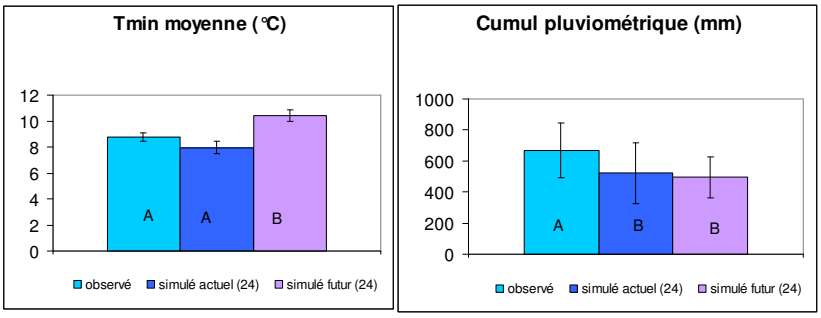
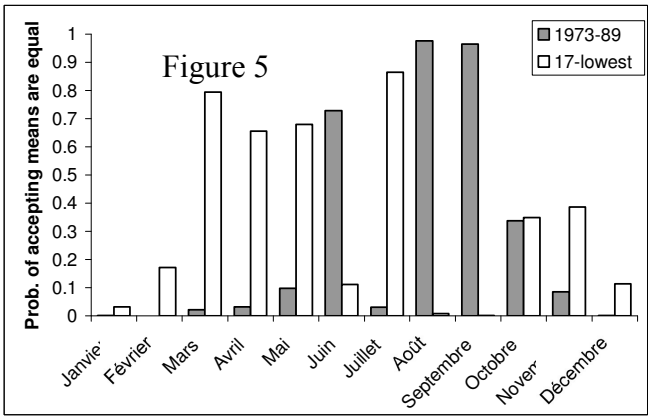


Figure 4 : Comparaisons statistiques des séries observées et simulées (actuelle et future) pour la région d'Avignon. Les séries portant la même lettre sont statistiquement semblables au sens de Student.

Alors que dans le Sud, le modèle a tendance à sous-estimer la pluviométrie, dans le Nord c'est l'inverse. Les auteurs du modèle climatique (Gibelin et Déqué, 2001) montre que ce biais dans l'estimation des précipitations peut s'expliquer par la faible résolution de la grille, qui a du mal à prendre en compte correctement les phénomènes convectifs.



Les comparaisons deviennent très délicates lorsque les séries ne sont pas de même longueur. A Mirecourt en Lorraine (Figure 5), Diaz (2004) montre le résultat de deux sélections possibles pour comparer une série réelle de 1973 à 1989 à la série simulée (1960-1989) : en faisant une correspondance par année ou en choisissant les 17 années où la pluviométrie est la plus faible. Cette dernière méthode améliore le test pour la période printanière. Une autre méthode, proposée par Obled (2004), consiste à rapprocher les années simulées et observées sur la base d'analogie en terme de précipitations annuelles.

En résumé, si les données de température sont fiables, les données de pluviométrie ne le sont pas et il est nécessaire d'effectuer un prétraitement qui peut consister à i) soit corriger le biais sur la pluviométrie au pas de temps mensuel (Lebonvallet, 2002) ou ii) à éliminer certaines années sur la base de rapprochement analogique en terme de pluviométrie annuelle.

- **Fiabilité agroclimatique**

En considérant que nous souhaitons utiliser les données climatiques par l'intermédiaire d'un modèle de culture, nous pouvons également tester la fiabilité des séries climatiques à travers ce filtre agronomique. En reprenant l'exemple de Mirecourt et en comparant « brutalement » les résultats moyens d'une simulation standard de blé pour la série de 17 ans (73-89) et la série simulée (60-89), nous sommes surpris de constater que les résultats ne sont pas si mauvais (tableaux ci-dessous). Evidemment ces chiffres moyens recouvrent des variabilités très différentes dans les deux cas mais on peut décider que seule les données moyennes ont un sens.

Sorties STICS	Mirecourt	
	Observation	simulation
Date de récolte	8 août	6 août
Rayonnement intercepté (MJ)	578	610
Rendement (t :ha)	5.5	5.9
Biomasse (t/ha)	16.2	17.2
Quantité d'azote dans la plante (kg/ha)	147	151
Teneur en protéine du grain (%)	10.4	10.0
Azote lessivé (kg ha-1)	50	61

Conclusion

L'utilisation des scénarios de changement climatique n'est pas triviale et il convient de prendre un certain nombre de précaution lors de leur utilisation. La méthode des anomalies est sans doute la plus « sécurisante » mais la recherche de méthodes alternatives permettant de conserver la logique physique des sorties des modèles de climat semble être la voie d'avenir.

Bibliographie

Diaz, R., 2004. Global change and crop modelling projet. Rapport de stage interne INRA 32p.

Ducharne et al., 2004 Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. Rapport GICC Seine

Gibelin, A.-L., Déqué, M. 2001. Un scenario a l'ecchelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXIeme Siecle. Meteo France, Centre National de Recherches Météorologiques. Note de Trvail 79. 64 pp.

GIEC, 2001. Climate Change 2001 : impacts, adaptation and vulnarability. Contribution of the Working Group II to the third assessment report of IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.

Juin S., Brisson N., Clastre P., Grand P., 2004. Impact of global warming on the growing cycles of three forage systems in upland areas of southeastern France. Agronomie accepté

Kittel, T.G.F., Giorgi, F. & Meehl, G.A., 1998: Intercomparison of regional biases and doubled-CO2 sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments. *Clim. Dyn*., 14: 1-15.

Lebonvallet, S., 2002. Simulation de l'azote chez le blé dur et impacts des changements climatiques. DEA Adaptation des plantes cultivées aux contraintes environnementales, pp29 + annexes

Obled, C. 2004. An alternative method in hydrometeorological modelling: the analogue based approach. Lettre pigb-pmrc France N° 16 – Changement global:7-13.

Planton, S (1999) Incertitudes sur la détermination des changements climatiques. Papier présenté à l'Ecole Thématique du CNRS " *Risques et incertitudes: le cas du changement climatique* ", Les Houches, 17-22 novembre 1999.

Seguin et Stengel, 2002. Numéro spécial INRA-Mensuel

Semenov M.A., Brooks R. J., Barrow E., Richardson C. W., Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, climate research 10 (1998) 95-107.

Test de stics 6 pour sa généralisation à l'ensemble des cultures des rotations d'un bassin Hydrologique

* *Beaudoin N[1], Ponsardin G[1], Launay M[2], Sauboua E[1], Bernard P[2], Ripoche D[2], Brisson N[2], Mary B[1]
.[1]INRA, Rue Fernand Christ, , 02007 LAON Cedex, INRA domaine St Paul, 84914 Avignon Cédex
*Corresponding author : email: beaudoin@laon.inra.fr,

Introduction

La directive cadre européenne pour l'eau (2000) donne un nouveau challenge pour les agriculteurs et gestionnaires de l'eau : que l'ensemble des masses d'eaux souterraines et superficielles soient de bonne qualité en 2015. Cela demande de pouvoir évaluer l'impact des pratiques culturales sur le nitrate lixivié. Des expériences ont montré l'opérationnalité de STICS 4 à l'échelle du bassin (Schnebelen, 2000, Sauboua, 2001). Cependant, les tests entrepris ont peu porté sur les conséquences de l'enchaînement à long terme (plus de 3 ans) et de l'intégration spatiale. Nous voulons tester la capacité de la version 6 à restituer le stocks d'eau et d'azote minéral du sol au bout de 8 ans de simulations sur divers types de sols et successions culturales d'un petit bassin. Un préalable consiste à s'assurer de sa robustesse en situations variées et à l'échelle annuelle. Le modèle sera ensuite généralisé à l'aide d'un SIG (Couturier et al., poster).

Matériels et méthodes

Le bassin d'alimentation de Bruyères (F-02) est un plateau de 187ha, dont 137 en céréales et grandes cultures, situé 10km au sud de Laon (02). Les 21 parcelles agricoles du bassin font l'objet d'une mise en oeuvre systématique de pratiques raisonnées de gestion de l'azote depuis 1990 (Beaudoin et al, 2004). 36 stations représentatives de la nature des cultures et des sols ont été définies (figure 1). Des données agronomiques y sont acquises, portant sur les itinéraires techniques, la production et l'absorption d'azote des cultures principales et des cultures intermédiaires piéges à nitrate (CIPAN), et sur les stocks d'eau et d'azote du sol, pendant 8 années successives.

Le test de STICS consiste à vérifier sa robustesse, en nombre stations différenciées, d'abord à l'échelle du cycle cultural, puis en l'enchaînant dans le temps. Les cultures impliquées sont celles du site de Bruyères : blé, betterave, pois, colza, maïs et orge de printemps comme cultures principales et la moutarde et le seigle comme CIPAN.

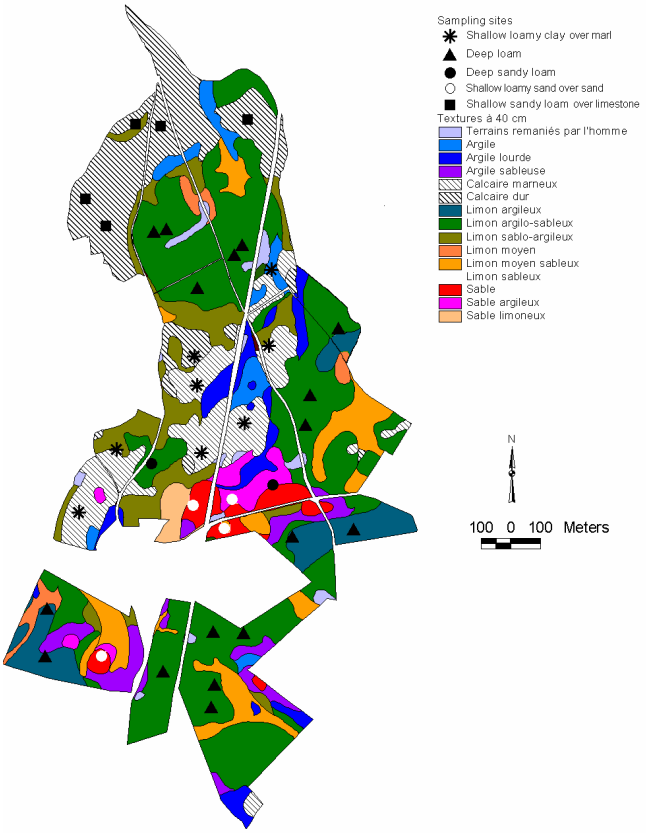


Figure 1 : Carte des textures de sol à 40 cm de profondeur du bassin de Bruyères et localisation des 36 stations de mesures.

La version STICS 4 a fait l'objet d'un important travail de calibration des fichiers « plantes » (*plt)* dans le cadre du PIREN Seine (Ponsardin, 2000). Il a utilisé les données issues de diverses expérimentations INRA, dont l'ensemble est appelé « base de données STICS » (BD Stics) :

- blé : essais d'Aulnois, Grignon, Pouilly et Villamblain (INRA Laon- Grignon- Orléans) ;
- betterave : essais de Mons (INRA Laon) ;
- pois : essais d'Epoisses (INRA Dijon) ;
- colza : essais du Rafidin et de la Marne (INRA de Grignon, Reims et le Cavisa.)
- maïs : essais de Lusignan, Villamblain (INRA Lusignan, Toulouse, Orléans, Avignon)

Puis, des tests prédictifs ont été faits sur la base de données de Bruyères, appelée « BD-Bruyères ».

Les versions 5 puis 6 du modèle STICS ont été produites respectivement en 2002 (Brisson et al., 2003) et en juin 2004; ce qui demande de poursuivre les tests commencés par Dorsainvil, 2002 et Houles, 2004.

Le test à l'échelle du cycle végétatif des versions 5 et 6 a consisté à confronter les sorties de variables d'intérêt aux données de la BD Stics (test réplicatif) puis de la BD Bruyères (test prédictif). Face à de moindres performances des versions 5 ou 6, le choix a été fait de réduire les formalismes utilisés à ceux de la version 4, en particulier pour le *LAI* (*LAI net*). Cette version est appelée 6/4 (modèle 6 avec paramètres *plt* de la 4). Des paramètres ont du y être parfois modifiés à cause de l'évolution des autres formalismes. Le test est complété par une évaluation de règles de paramètrage de *profres* et du *paillis* sur des données obtenues en sol nu sur le site de Bruyères.

Le test à l'échelle pluriannuel consiste à enchaîner STICS 6 sur plusieurs années sans réinitialisation et à confronter les variables d'intérêt simulées aux données mesurées du site de Bruyères et du lysimètre N°6, en sol nu, de l 'INRA à Fagnières (51).

Les critères statistiques utilisés sont comparer les versions sont l'efficience, l'erreur moyenne (EM) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), définis ainsi :

$$EF = \left(\sum_{i=1}^{n} (Oi - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n} (Si - \overline{O})^2 \right) \Big/ \sum_{i=1}^{n} (Oi - \overline{O})^2$$

; ou Si = simulé, O= observé, Ô = moyenne des observés

$$EM = \left(\sum_{i=1}^{n} Oi - \sum_{i=1}^{n} Si \right) \Big/ \sum_{i=1}^{n} Oi \; ; \; RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Si - Oi)^2}{n}} \times \frac{100}{\overline{O}}$$

Les variables d'intérêt sont Resmes, Azomes, Masec, *QNPlante* et *Magrain* auxquelles s'ajoutent *drat*, l*ess ; Nhumt* et *Chumt* pour le lysimètre. La quantité de résidus et leur rapport C/N sont appréhendés à partir de *QNPlant*e et *QNGrain*.

Résultats

<u>Tests à l'échelle du cycle cultural</u>. Les performances des différentes versions : 4, 5, 6/4 et 6 sont comparées successivement sur les BD STICS et BD Bruyères (figure 2). On constate que :

- les performances de prédiction de la version 4 ne sont pas exactement retrouvées en gardant les mêmes paramètres *plt* dans les versions postérieures, à cause de changements de formalismes;
- les corps de paramètres proposés en version 5 amenaient à une sous-estimation des matières sèche d'un facteur 2 pour le pois, le blé et le maïs et simulait des absences erronées de levée.
- L'efficience est toujours supérieure à 0.5 sauf pour *Magrain, Azomes* et pour le pois. La fixation symbiotique du pois est insuffisante car la simulation de *Masec* de pois fertilisés est correcte.

- Les qualité des simulations de *Masec* et *QNPlante* des versions 6/4 et 6 sont comparables. La version 6 est préférée pour les cultures perdant leur feuilles car la simulation du *LAI* y est plus fiable (Betterave - colza-moutarde). Inversement, la version 6/4 est gardée pour les cultures de blé, le pois et le maïs, aux performances comparables avec un formalisme plus simple. La version 6/4 du blé utilise une seule variété (Beaudoin et al, 2002). Les paramètres des composantes de rendement en sont repris de la version 5 mais demanderaient plus ample étude ;
- Des versions succédanées pour l'escourgeon, l'orge et le seigle sont dérivées du blé6/4NB.
- Sur la BDBruyères, la qualité des prédictions pour la culture de colza est nettement moindre, peut être à cause de la variabilité des nombres de pieds des cultures; celle d'Azomes y est meilleure pour les cultures de blé et pois. Le modèle sous estime le rendement mesuré en placettes à Bruyères pour les cultures de betterave et de pois. Les données de rendement « placette » sont supérieures de 30% au rendement moyen parcellaire obtenue par la machine.
- L'efficience de la prédiction de Resmes est supérieure à 0.85 malgré l'existence de cailloux.

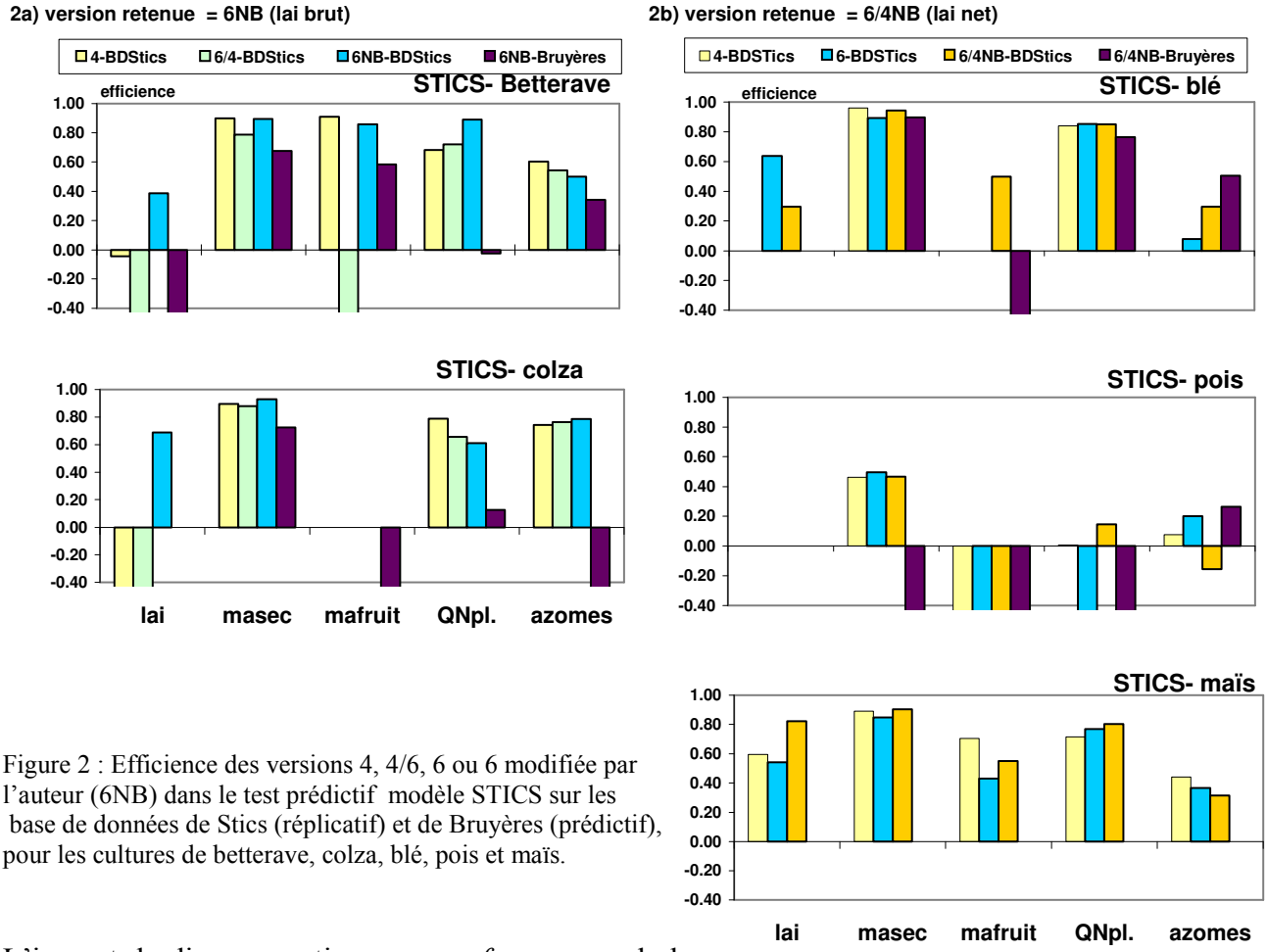


Figure 2 : Efficience des versions 4, 4/6, 6 ou 6 modifiée par l'auteur (6NB) dans le test prédictif modèle STICS sur les base de données de Stics (réplicatif) et de Bruyères (prédictif), pour les cultures de betterave, colza, blé, pois et maïs.

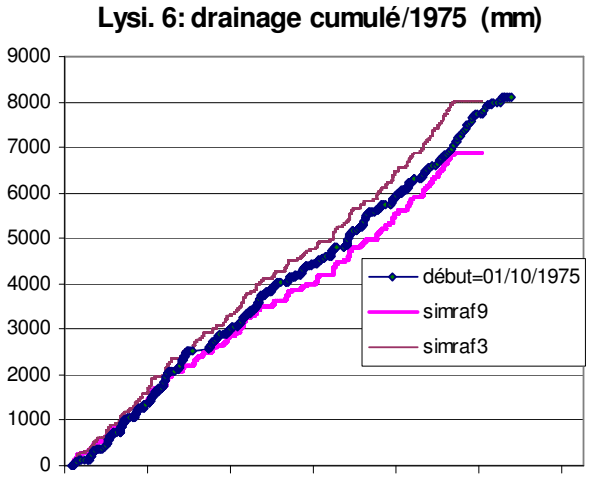
L'impact de diverses options sur *profres* en cas de labour et de la présence du *paillis* après récolte a été étudié sur 16 situations avec sol nu, en automne. L'efficience du modèle pour prédire *Resmes* et *Azome*s passe respectivement de 0.87 et 0.25 pour profres=0 et avec absence de paillis à 0.89 et 0.43 pour profres = (proftrav-1cm) et avec présence de paillis.
Les performances des simulations de seigle et moutarde à Bruyères donnent des efficiences négatives; la qualité des informations d'entrée concernant l'interculture est souvent problématique.

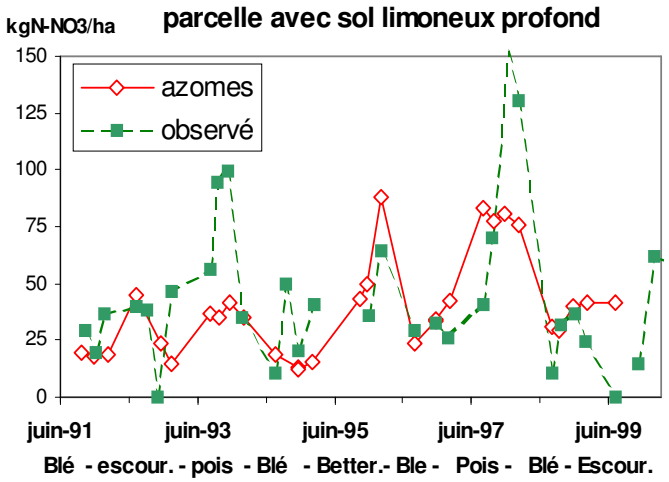
Test à l'échelle pluri-annuelle. Les modules de bilan hydrique et de minéralisation de l'azote en sol nu est évalué à l'aide des 32 années de données de la case lysémétrique N° 6 de l 'INRA-Fagnières (figure 3). Le calcul du drainage est sensible à la valeur q0; la valeur retenue est 6mm. La bonne prédiction du taux de carbone du sol conforte la crédibilité du module de minéralisation en sol crayeux. Les tests sur les données de Bruyères en cours. La non vernalisation de certaines repousses engendre une non simulation; il faudrait pouvoir simuler au moins un sol nu. Deux exemples de parcelles prises au hasard sont donnés (figure 4). Les principaux écarts apparaissent avec le pois. Il ne semble pas exister pas de dérive du modèle dans ces situations où la gestion d 'N est raisonnée. Mais, des cas aberrants sont apparus en enchaînant STICS 5 couplé à un SG (Couturier et al, poster)

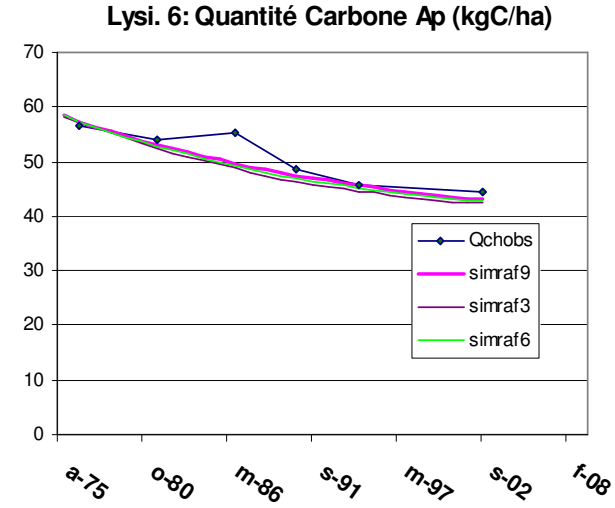
Conclusions

Les bases de données utilisées pour la calage des paramètres "plante" nécessitent une expertise sur la signification du rendement mesuré et sur l'homogénéité des informations entre les variables concernant les parties aériennes, le sol et l'enracinement. Le formalisme du modèle doit être accordé avec les bases disponibles (ou inversement).

- Le test du modèle implique l'hypothèse que seuls les facteurs eau et azote peuvent être limitants. Cela peut être invalidé en situation agricole. Les informations sur les conditions d'interculture, en particulier sur les levées des CIPAN et *a fortiori* des repousses y sont de qualité médiocre; un couplage avec des mesures de télédétection serait utile.
- Mettre en place un test à l'échelle d'un bassin est lourd mais permet de détecter nombre d'interactions passées inaperçues en situations expérimentales isolées.
- Le test de la version 6 du modèle, enchaîné à l'échelle de la rotation, est en cours.







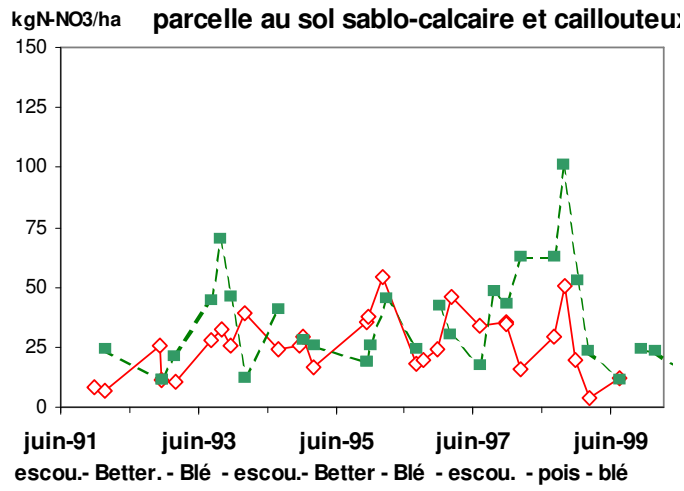


Fig. 3 :Cinétiques de drat (mm) et de Qhumt (kgC/ha) simulés et observés sur le lysimètre 6 de Fagnières (F-51) pour différentes valeurs de q0 (mm).

Fig. 4 :Cinétiques d 'azomes (kgN/ha) simulés ou observés pour deux parcelles différenciées du bassin de Bruyres (F-02).

References

Beaudoin N. et al, 2001. 3eme ECPA, Montpellier.

Beaudoin N., *et al*., 2004. In Monestiez *et al*., Coll. Science Update, INRA Eds, p 117-141.

Brisson, N., *et al*. ,2003. *European Journal of Agronomy, 18,* 309-332.

Dorsainvil F., 2002. Thèse de doctorat de l'INAPG. 124 p + annexes

Houles.V., 2004. Thèse Doctorat INA-PG, 294 pp+ annexes.

Ponsardin G, 2000. Les plantes dans STICS- document interrne INRA LAON/PIREN Seine.

Sauboua E. 2001. Thèse de docteur du LTHE . Université de Grenoble.

Schnebelen,N., 2000. Thèse de docteur de l'université d'Orléans. 309 p+annexes.

L'enchainement des simulations annuelles pour les cultures perennes

P. Bernard, N. Brisson
INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.

Introduction

Jusqu'à présent il était possible de simuler l'enchaînement de plusieurs années de culture pour les cultures annuelles en conservant l'état minéral et organique du sol en fin de simulation annuelle pour initialiser l'année suivante. Pour les plantes pérennes l'enchaînement ne tenait pas compte de l'état physiologique de la plante lors du changement d'année.
Le travail, présenté ci-dessous, a pour objectif de reproduire de façon plus réaliste le fonctionnement des cultures pérennes en conservant les états phénologique et trophique, ainsi que la mémoire de la plante d'une année à l'autre. Il s'appuie sur deux exemples de cultures pérennes : une culture pluriannuelle de fétuque (herbacée qui n'arrête jamais sa croissance) et la vigne (ligneuse qui admet une période de repos hivernal sans croissance) simulées avec des itinéraires techniques très simplifiés sans fertilisation ni irrigation dans des contextes climatiques du sud de la France.

Principes de l'enchaînement

L'enchaînement se fait pendant la période de repos hivernal, quand les besoins en froid (vernalisation pour les herbacées et dormance pour les ligneuses) sont satisfaits. Dans la version « non enchaînée » cette date est prescrite à une valeur fixée pour l'ensemble des années ; dans la version « enchaînée », cette date est calculée par le module « besoins en froid » du modèle. Dans les contextes climatiques tempérés, la fin de repos hivernal intervient généralement entre le 15 novembre et le 15 janvier. En conséquence l'année culturale commence souvent en fin d'année précèdent l'année de production et les dates des techniques appliquées doivent en tenir compte.
Le statut physiologique de la plante à conserver d'une année à l'autre concerne les aspects phénologique, foliaire et trophique. **Pour les herbacées**, après la vernalisation, on considère que l'échelle phénologique végétative redémarre au stade LEV alors que l'échelle reproductrice est remise à zéro. Au sujet du feuillage, il n'y a pas vraiment d'arrêt de production des feuilles au sens ontogénétique mais un ralentissement pendant la vernalisation pris en compte par le paramètre ULAIMAX <3. La conservation de la mémoire des durées de vie foliaire permet de simuler la continuité du processus de sénescence. Les biomasses carbonées et azotées sont conservées à l'enchaînement, ainsi que les réserves qui peuvent être utilisées au démarrage printanier car supposées être stockée dans les racines. **Pour les ligneux**, a la levée de dormance la plante doit encore effectuer le parcours de développement STDORDEBOUR pour parvenir au débourrement correspondant au stade LEV. Il y a disparition du feuillage pendant la dormance (stade LAX à l'automne) et les réserves accumulées après la récolte sont supposées être stockées dans les racines et sont remobilisables au printemps. Pour les deux types de plantes, on considère que l'azote ne disparaît de la plante que par prélèvements (récolte, coupe) ou par chute des feuilles.

Protocoles de simulation

Pour tester les innovations détaillées ci-dessus, nous avons fait tourner le modèle dans les conditions suivantes :

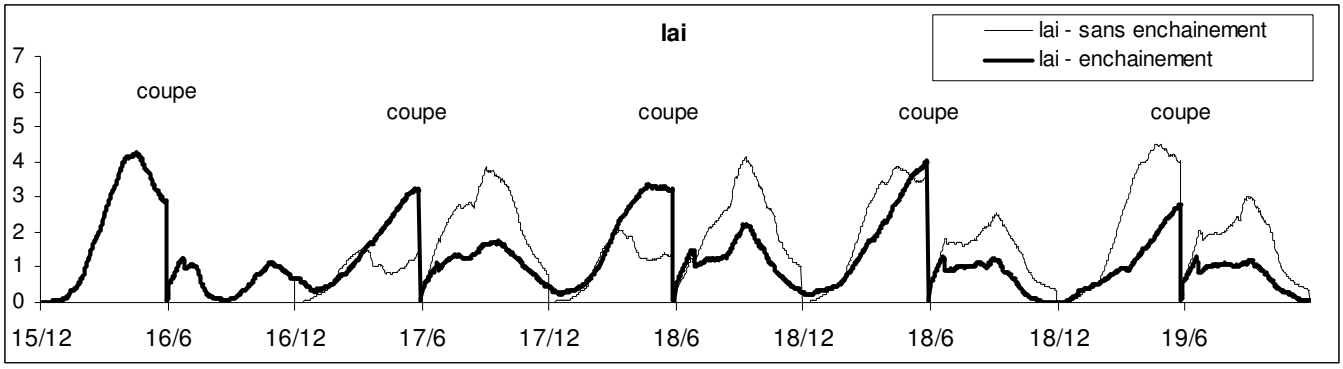
Plante	Fétuque	Vigne
Site	Montpellier	Avignon

Sol	Limoneux et peu organique	Limono-sableux avec cailloux et peu organique
Période[4]	1994-2003	1996-2003
Date de début pour version non enchaînée (date fixe supposée de fin de dormance ou vernalisation)	15/12	10/12
Itinéraire technique	Une fauche unique le 15/06 Ni eau, ni azote	Rognage le 20/06 Taille le 01/12 Ni eau, ni azote
Initialisation	Eau du sol à la capacité au champ, azote sol 50 kg /ha, racines à 70 cm	Eau du sol à la capacité au champ, azote sol 20 kg /ha, racines à 40 cm

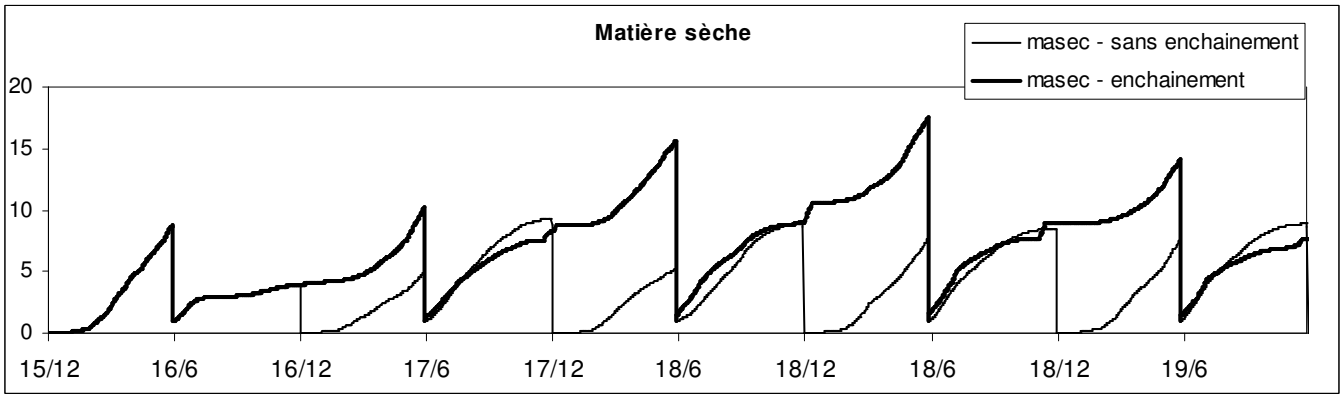
Résultats :

FETUQUE

La dynamique du LAI est différente dans la version « enchaînée » à cause de la mémoire de la plante et du sol.

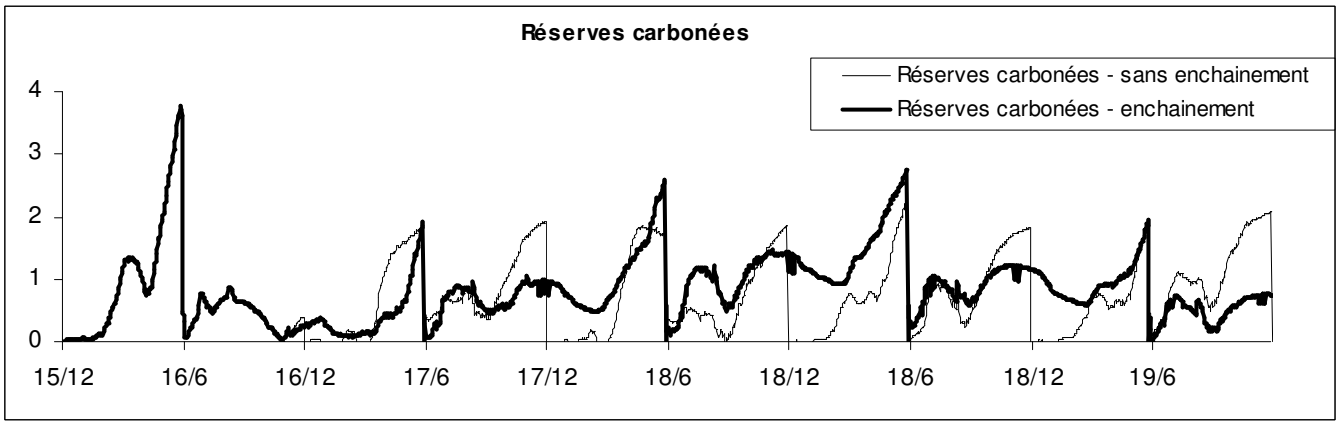


La plante s'arrête de croître en hiver pour des raisons phénologiques et climatiques. La remise à zéro de la biomasse dans la version « non enchaînée » a le même effet qu'une coupe. Dans la version « enchaînée », la biomasse hivernale devient peu à peu sénescente de sorte que les biomasses vertes sont dans des ordres de grandeurs comparables dans les deux options. Elle bénéficie de la remobilisation des réserves au redémarrage en fin de vernalisation.

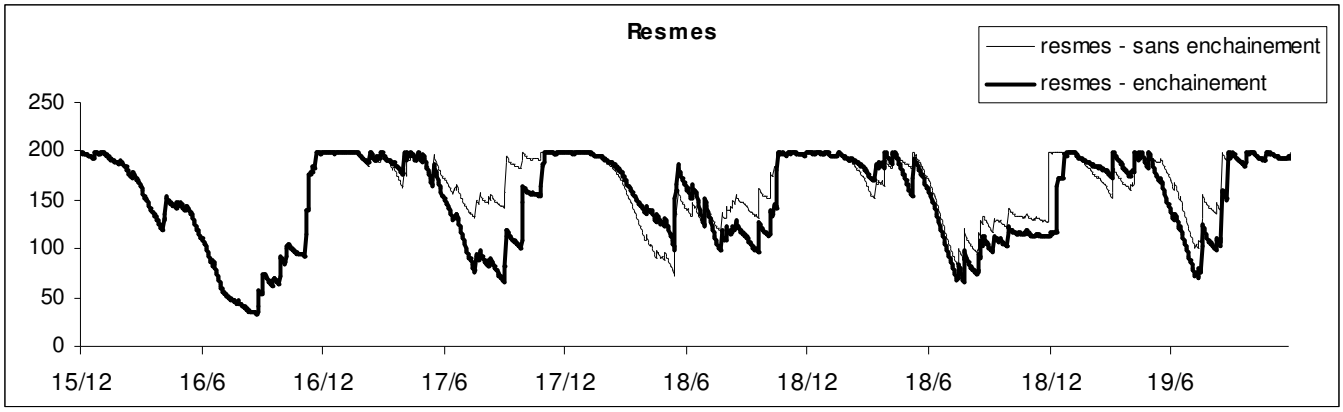


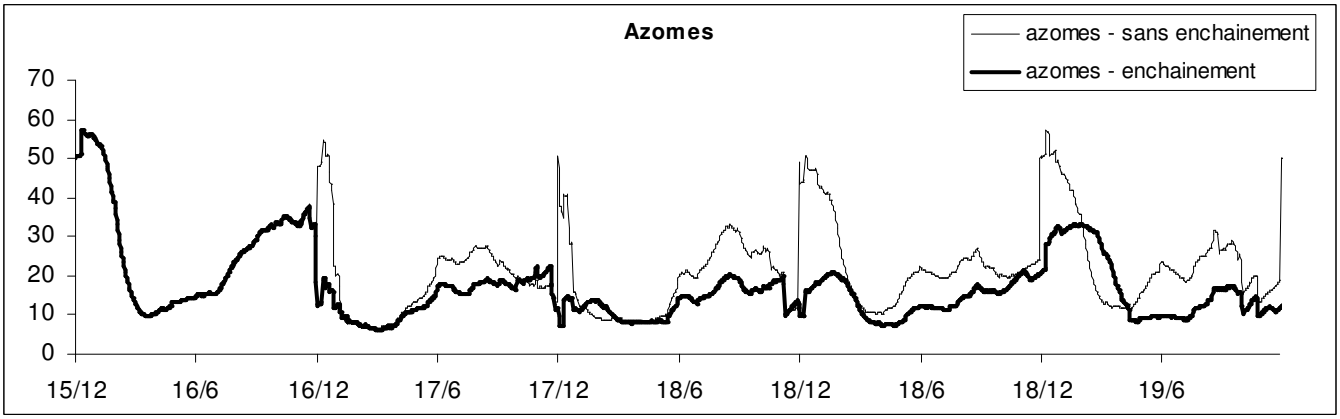
[4] Seul les 5 premières années sont représentées dans le papier.

Avec la version « enchaînée », la dynamique de stockage-déstockage des réserves carbonées est continue : mise en réserve pendant les périodes de forte croissance et utilisation pendant les périodes de stress ou de redémarrage.



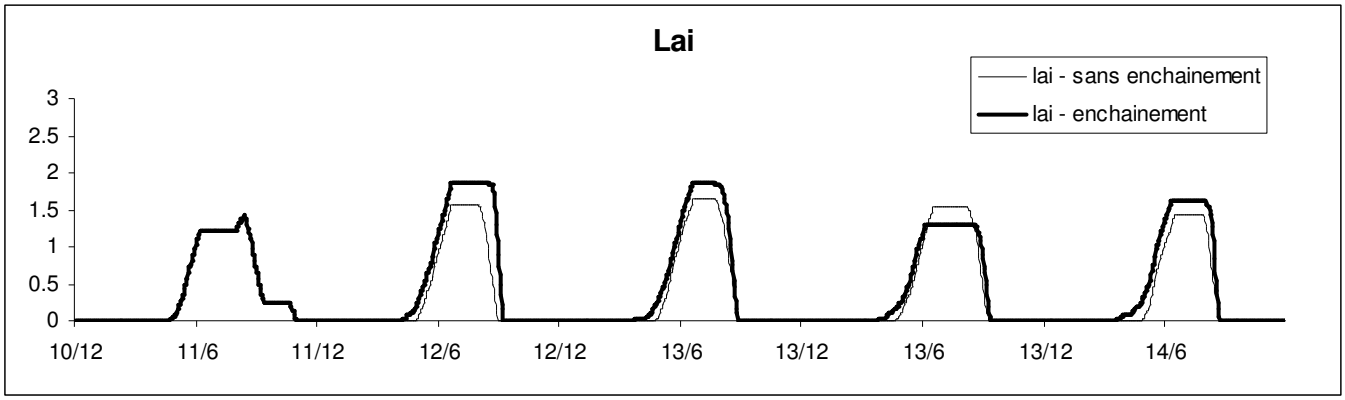
L'initialisation du statut hydrique du sol pendant l'hiver a peu d'impact à cause du remplissage par les pluies d'hiver et de printemps. Ce n'est pas le cas pour le statut azoté qui se détériore à long terme. Cela manque sans doute de réalisme car le recyclage des racines sénescentes n'est pas pris en compte.



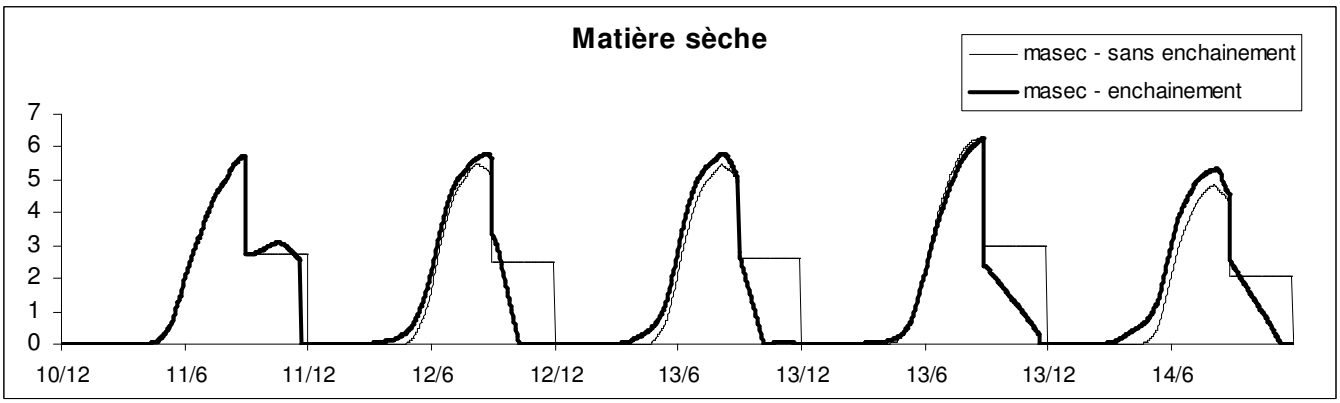


VIGNE

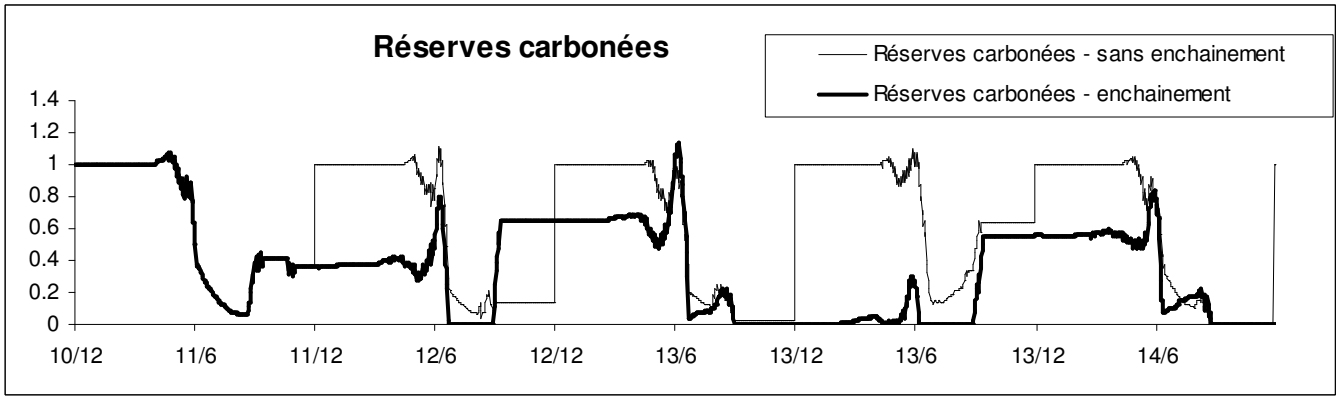
Les dynamiques de LAI est sont très semblables, même si le démarrage au printemps est un peu plus précoce avec l'option « enchaînée ». Cela s'explique, en partie, par le contrôle du LAI exercé par le viticulteur par les opérations de rognage**.**



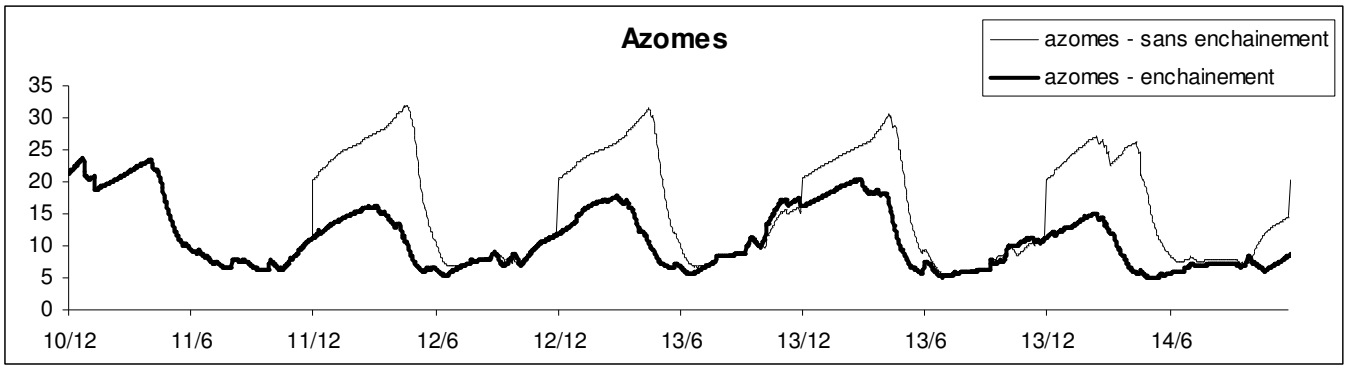
La biomasse post-récolte décroît, de façon tout à fait logique, alors qu'elle stagne avec l'option « non enchaînée » en dépit de la disparition progressive du LAI. Cela est lié à un artéfact dû à la succession des années de simulation requise pour la simulation de la dormance.



Les réserves sont consommées pendant la période de croissance et reconstituées à l'automne à un niveau plutôt de l'ordre de 0.5 t/ha que de 1 t/ha (initialisation nominale).



Sans apport d'engrais, le seul apport azoté au sol est constitué des feuilles sénescente; ce qui ne suffit pas à reconstituer en début de simulation le niveau supposé dans la version « non enchaînée ».



Ces innovations dans le modèle permettent de reproduire de façon plus réaliste le comportement des plantes pérennes en gardant la mémoire de l'état du sol et des plantes. Le choix d'enchaîner les simulations à la fin du repos hivernal est une simplification mais on constate qu'il n'introduit pas de discontinuité dans la dynamique des principales variables d'état.

Simulation de la dynamique du carbone et de l'azote sur le court-terme et le long-terme.

B. Gabrielle*[a], B. Mary[b], R. Roche[a], et P. Smith[c]

[a] *UMR INRA INA P-G Environnement et Grandes Cultures, 78850, Thiverval-Grignon, France*
[b] *INRA, Unité d'Agronomie, rue Fernand Christ, 02007, Laon, France*
[c] *Department of Plant and Soil Science, University of Aberdeen, Aberdeen, UK.*
**E-mail:* Benoit.Gabrielle@grignon.inra.fr

Abstract

Although mechanistic soil-crop models are increasingly accepted as valuable tools in analysing agronomical or environmental issues, potential users are faced with an equally increasing number of available models. In principle, model selection should be based on a rational assessment of its merit with respect to the objectives pursued. Such information may be obtained by comparing the ability of candidate models to predict given sets of experimental data. However, because the basic components of soil-crop models interact strongly in producing model outputs, little can be drawn as to the validity of the approaches used for the individual components.

Here, we focused on the soil carbon and nitrogen turnover module of four soil-crop models (CERES, NCSOIL, SUNDIAL, and STICS), which were selected based on their representativity of currently used models, and the range of complexity and process approaches they offered. The C–N modules of models other than CERES were extracted and linked within CERES, so that they were all supplied with the same physical and chemical data. Inputs and outputs other than those involved the N cycle were provided with good reliability by the common CERES shell. The performance of the various modules was assessed according to two criteria: short-term response of topsoil inorganic N to climate and crop residues input, and long-term dynamics of soil organic matter (SOM). Accordingly, data sets involving net mineralization and topsoil inorganic N dynamics under contrasting bare or wheat-cropped soils, and long-term soil carbon data were used to test them. The results highlight a trade-off between the prediction of N mineralization in the short-term (day to year) and SOM dynamics in the long-term (year to decade). On a yearly basis, NCSOIL over-estimated immobilization of inorganic N associated with the decomposition of crop residues, and CERES predicted extremely low mineralization fluxes. STICS and SUNDIAL gave good predictions of soil N supply, but over-estimated the rate at which soil carbon from slow-turnover pools was degraded as a result. Comparison with a model dedicated to predicting SOM turnover (RothC) showed that the discrepancy may be attributed to a strong under-estimation of the turnover of below-ground plant material by the plant modules of CERES. Crop models should thus be improved from this point of view before coupling with SOM models.

References

Gabrielle, B., et al. (2002). *European Journal of Agronomy, 18,* 107-120.

ORCHIDEE-STICS , un outil pour l'étude des intercations entre ecosystemes cultivés, cycles du carbone et de l'eau et climat

Pascalle SMITH*, Yann MEURDESOIF, Nicolas VIOVY, Sébastien GERVOIS, Nathalie DE NOBLET-DUCOUDRE, Bernard SEGUIN et Philippe CIAIS

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, DSM/LCSE, UMR CEA-CNRS, L'Orme des Merisiers, Bâtiment 712, 91191 GIF-SUR-YVETTE, France.

* *e-mail:* pascalle.smith@cea.fr

Introduction

La spécificité des écosystèmes cultivés a longtemps été négligée dans les modèles dynamiques globaux de végétation (DGVM), destinés à simuler le fonctionnement des écosystèmes terrestres à l'interface biosphère-atmosphère. Ces modèles, en général appliqués à l'échelle globale, à une résolution de l'ordre de 100km*100km, reposaient sur une simplification importante : les surfaces agricoles étaient assimilées à des herbacées naturelles. Or ces dernières ont un cycle saisonnier moins marqué et une productivité inférieure à celle des cultures. De plus, les pratiques comme l'irrigation, l'exportation des produits de la récolte etc. ont un impact sur les flux de carbone et d'eau échangés de même que sur les propriétés du sol. Peu d'études se sont intéressées jusqu'à maintenant à l'effet des zones agricoles sur les cycles bio-géochimiques *(Bondeau & Smith, in prep.,Kucharik & Brye, 2003)* et sur le climat à l'échelle globale et régionale.

Matériel et méthode

STICS *(Brisson et al., 2002)* est un modèle capable de simuler l'élaboration du rendement de nombreuses cultures en réponse aux conditions pédo-climatiques et techniques du site auquel il est appliqué. Ses aspects générique et modulaire en font un modèle intéressant à coupler à ORCHIDEE *(Krinner et al., 2005)* en vue de développer un outil pour l'analyse des perturbations induites par l'Homme sur les écosystèmes terrestres.
Une plate-forme de couplage souple a ainsi été développée au LSCE (cf. poster de Yann Meurdesoif *et al.*) permettant l'échange de variables entre les deux modèles. Celles représentant les processus-clés des surfaces agricoles, absentes ou mal simulées par ORCHIDEE sont maintenant assimilées par ce dernier pour 2 cultures en C3 (type hiver/printemps) et une en C4. La spatialisation de STICS a été une étape nécessaire au couplage. Le développement et l'évaluation du modèle couplé continuent dans le cadre des projets européens CarboEurope, QUEST, ENSEMBLES et GREENCYCLES.

Résultats
Les premières simulations à l'échelle de l'Europe *(Gervois et al., 2004, De Noblet-Ducoudré et al., 2004)* montrent une nette amélioration de la saisonnalité et de la productivité des cultures simulées par ORCHIDEE-STICS par rapport à ORCHIDEE-standard lorsqu'on les compare à des données d'origine satellitaire et aux statistiques de rendements. Les pratiques agricoles, en particulier la fertilisation, sont le facteur principal ayant contribué au triplement des rendements du blé en France au cours du XXème siècle (par rapport à d'autres forçages comme le changement climatique et à l'augmentation du taux de CO_2 atmosphérique). La distinction de plusieurs variétés apparaît nécessaire pour capter la variabilité spatiale de ces rendements. Le problème de la synthèse de données historiques et spatialisées à l'échelle de l'Europe a été soulevé.
L'application d'ORCHIDEE-STICS à l'analyse d'évènements extrêmes comme la sécheresse de 1976 montre une réponse significative des rendements à l'anomalie positive des températures estivales et négative des précipitations de printemps et d'été (centrées sur le Bassin Parisien) : le rendement du blé simulé en 1976 est de moitié par rapport à la moyenne de la période 1970-1980.

Conclusion et perspectives
L'outil ORCHIDEE-STICS présente un fort potentiel et nécessite la poursuite de sa validation. Dans le cadre de l'étude de la variabilité inter-annuelle des flux de carbone, d'eau et d'énergie captée par le modèle couplé, l'accent sera mis sur l'analyse de la sécheresse de 2003. Le modèle couplé sera utilisé pour étudier les effets des conversions d'un type d'utilisation du sol, ou d'un mode de gestion d'une culture à un autre sur les flux issus des compartiments de carbone du sol. Des simulations couplées avec le modèle de circulation atmosphérique de l'IPSL permettront d'étudier l'impact des surfaces cultivées et des changements d'utilisation des sols sur le climat.

Références
Bondeau & Smith (in prep.)
Brisson et al. (2002). *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
De Noblet-Ducoudré et al. (2004). *Agronomie*,
Gervois et al. (2004). *Earth Interactions*, 8, 16.
Krinner et al. (2005). *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199.
Kucharik & Brye (2003). *Journal of Environmental Quality*, 32, 247-267.

4. Couplages avec d'autres modèles

Animateur table ronde : A. Olioso

Modèles spatiaux, temporels, modes de couplage ou d'interfaçage

Couplage de STICS avec AROPAj : un Modèle d'interfaçage par le biais de courbes de réponses

P.A. Jayet*, C. Godard, E. Debove

INRA, Unité Mixte de Recherche en Economie Publique, BP01, Centre INRA de Versailles – Grignon, 78850 Grignon, France.

**Auteur correspondant, email: jayet@grignon.inra.fr*

Introduction

L'analyse et l'évaluation des impacts de la régulation économique et des modifications du milieu sur le secteur de production agricole devraient tenir compte de la grande diversité des systèmes de production. A côté des modèles économiques de type macro-économétrique sectoriel ou de type d'équilibre général, les modèles de programmation mathématique représentent les systèmes à différentes échelles en partant d'exploitations agricoles type bien spécifiées. Le modèle AROPAj est de cette facture, permettant une représentation de l'offre agricole fondée sur une typologie régionale des exploitations. C'est un modèle générique adaptable à différentes orientations techniques existant dans l'Union Européenne. On peut le décliner en autant de modèles types que les observations disponibles le permettent. Ces observations, fournies par le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA), sont essentiellement d'ordre comptable et micro-économique, alors que le modèle s'appuie également sur des éléments techniques.

La qualité de la représentation des ensembles de production (i.e. les ensembles de valeurs réalisables que peuvent prendre les variables de commande des systèmes) dépend donc étroitement de la qualité des relations techniques introduites dans le modèle. Nous nous intéressons ici aux relations entre rendements végétaux et intrants azotés, qui, initialement, sont limités à un couple de valeurs (dépendant de l'exploitation type et du type de production). L'intérêt d'un modèle de culture générique conduit à un mode de relation formellement homogène, et donc plus aisément transposable dans le modèle AROPAj. Dans le même temps, il restitue, comme le permet la modélisation agronomique, la diversité des productions et des éléments pédo-climatiques et phénologiques (voir la synthèse proposée par Godard et al., 2005).

L'objectif de ce papier est de montrer comment le couplage externe entre les modèles AROPAj et STICS est rendu opérationnel, et comment les résultats du modèle économique en sont affectés.

Méthode

Le modèle AROPAj optimise la marge brute de chaque exploitation agricole type représentée par le calcul de l'allocation des terres, de la destination des produits végétaux (collecte ou consommation à ferme), de l'alimentation et du réajustement des troupeaux, sous des contraintes techniques et économiques (PAC) (voir par exemple Jayet, 2003, 2004). Dans un premier temps, c'est un ensemble de programmes linéaires (un par ferme type) dans lesquels les rendements et les charges variables sont estimés sur la base des observations du RICA pour chaque culture et chaque ferme type, puis considérés comme fixés. Aussi bien par souci de réalisme technique que pour l'avantage en terme économique qu'il y a à « lisser » les fonctions d'offre obtenues par le modèle, il convient de représenter la relation entre les charges variables et les rendements non plus par un seul point, mais par une fonction technique.

Pour cela, il est possible de s'appuyer sur un modèle agronomique permettant d'élaborer ce type de fonction, dans la mesure où la forme fonctionnelle retenue rend compatibles les hypothèses économiques qu'il convient de lui prêter et la validation agronomique. Du point de vue économique, la fonction est idéalement positive, monotone croissante et concave (Paris, 1992). Du point de vue agronomique, plusieurs formes fonctionnelles ont été étudiées (Oger, 1994). Nous nous

intéressons à l'azote, car nous faisons l'hypothèse qu'il est le facteur de production limitant pour les grandes cultures en Europe. Du fait de son adaptabilité à des contextes pédo-climatiques très variés, le modèle agronomique de cultures STICS est capable de fournir les relations attendues pour un grand nombre de cultures (Brisson et al., 2003), relations qu'il est possible de rendre explicites dans le modèle économique AROPAj. La forme finalement retenue est une forme exponentielle $r(N) = A + (B - A)\, e^{-\tau N}$ où r est la fonction de rendement, N la quantité d'azote total apporté à la culture, A la valeur du rendement sans apport azoté, et B sa valeur asymptotique quand l'apport devient grand, et τ la «vitesse » à laquelle est atteint le rendement maximal.

L'insertion des fonctions de réponse dans le modèle AROPAj suit un processus en trois étapes.

1. Le modèle AROPAj est modifié, avec l'introduction d'un module « azote » associant de nouvelles activités (i.e. de nouvelles variables de commande du modèle, participant à l'optimisation de la marge brute) telles que les apports d'azote, et les contraintes de satisfaction des besoins (combinant apports et besoins propres à chaque culture, ceux-ci étant associés aux rendements).
2. Préalable à l'introduction des fonctions de réponse, le calibrage du modèle AROPAj pour chacune des exploitations agricoles type représentées n'est pas remis en cause. Il convient donc d'ajuster les courbes de réponse, de sorte que chacune d'entre elle passe par le « point de calibrage » défini par le rendement de la culture (estimé à partir des données du RICA) et par la valeur de la pente de la tangente en ce point, égale au rapport du prix de l'azote sur le prix du produit. En réalité, on maintient la valeur des paramètres $\boldsymbol{A}$ et $\boldsymbol{B}$ à leur valeur donnée par STICS et plus précisément par la valeur des paramètres $\boldsymbol{A}$ et $\boldsymbol{B}$ de la « meilleure » fonction de réponse parmi les fonctions de réponse possibles (Fig. 1, et Godard et al, 2005a). Seul, le paramètre de courbure $\boldsymbol{\tau}$ est modifié (Fig. 2).
3. Enfin, l'optimisation via AROPAj est réalisée en deux temps. Avec l'hypothèse de prix implicites du produit (la culture) et du facteur (l'azote) égaux aux prix de marché, on détermine le rendement optimal et l'apport optimal en azote pour chacune des cultures et pour chaque ferme type pour lesquelles on dispose de fonctions de réponse. Les valeurs de rendement et de charges se substituent alors aux valeurs initiales, et les programmes linéaires du modèle AROPAj sont résolus avec les outils habituels (générateur de matrices et solveur). On démontre que l'hypothèse précitée est vérifiée dès lors que, dans la solution du problème (i.e. les surfaces, productions, collectes, autoconsommations à l'optimum), le produit doit être en tout ou partie collecté, et l'azote doit être en tout ou partie acheté (ce qui est implicitement le cas tant que les apports d'azote internes à l'exploitation – provenant des effluents d'élevage – ne sont pas pris en compte dans le modèle). A défaut, la solution exacte du problème demanderait un mode de résolution itératif, avec la détermination des prix implicites calculables en programmation linéaire (via les variables « duales » de l'optimisation sous contrainte), puis l'utilisation de ces prix pour le calcul du rendement et de l'apport, et enfin s'appuyer sur la comparaison avec les prix implicites recalculés à l'étape suivante de la programmation linéaire pour poursuivre ou arrêter le processus itératif.

En réalité, l'étape 3 du processus peut être intuitivement analysée de la façon suivante. Si la solution d'un programme linéaire conduit à une surface strictement positive allouée à une culture, il est normal que, toutes choses égales par ailleurs, la marge brute par hectare soit la plus élevée possible, conduisant à une optimisation du rendement et de l'apport tels que définis ci-dessus. Le mode de résolution du problème, qui en théorie n'est plus linéaire, permet en réalité d'utiliser les algorithmes et les solveurs de la

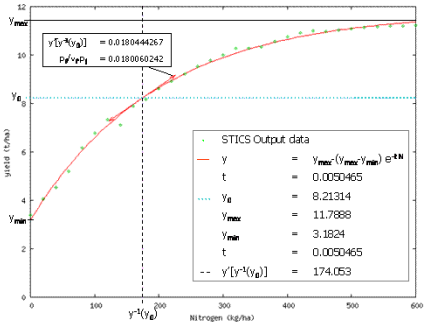


Figure 1. Exemple de fonction de réponse pour le blé tendre chez une ferme type "grandes cultures" en Picardie.

programmation linéaire, avec peu de modification sur la structure du modèle.

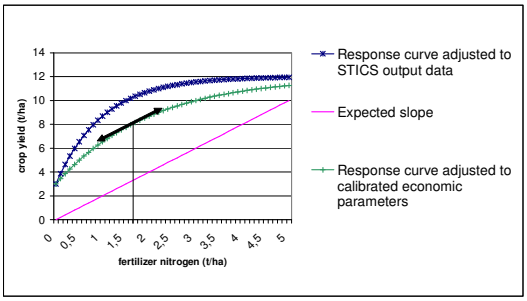


Figure 2. *Ajustement de la fonction de réponse STICS compatible avec le modèle calibré sur la base des rendement et charge variable de référence.*

Le modèle est actuellement modifié pour intégrer la gestion des effluents d'élevage et les apports d'azote d'origine organique. Le module épandage est préparé, en attente d'intégration des valeurs des paramètres (caractéristiques des effluents d'élevage par catégorie animale présente dans le modèle). Il complète en réalité le module « azote » précédemment évoqué, pour intégrer les contraintes environnementales (PMPOA) limitant l'épandage d'effluents par hectare de culture ou prairie.

Résultats

Un test de la méthode d'optimisation a été effectué sur un groupe pour une culture (le blé tendre du groupe « grandes cultures » en Belgique). Puis la prise en compte d'une première série de fonctions de réponse pour quelques cultures des exploitations agricoles type de la région Picardie permet d'en mesurer l'effet sur les sorties du modèle. Une fois ajustées, et les paramètres les caractérisant intégrés aux fichiers de données utilisés par les programmes linéaires, ces fonctions de réponse permettent d'obtenir des résultats intéressants à plusieurs titres. Pour cela, on effectue une série de simulations pour lesquelles seul change le prix du blé tendre autour du prix de référence (p_0=101.3€/t) sur un intervalle [p_0-10,p_0+10] par pas de 1€/t.

A l'échelle d'un groupe, avec l'insertion de la seule fonction de réponse associée au blé tendre, il est déjà possible d'observer un impact significatif sur les résultats comparés à ceux que l'on obtenait sans cette insertion.
En second lieu, il apparaît que la collecte de blé (l'offre, à proprement parler) se distingue fortement de la fonction en palier obtenue sans la courbe de réponse du rendement à l'azote, et présente une allure plus régulière et lissée.
Au vu de ces résultats, on doit s'attendre à des effets importants à plus grande échelle. L'insertion des fonctions de réponse pour la Picardie a été utilisée pour ré-évaluer le potentiel de réduction de l'effet de serre d'origine agricole (Godard et al, 2005). L'impact est très significatif, et compte tenu des ajustements offerts en matière d'émission de N2O par le « déplacement » sur les fonctions de réponse, on obtient une diminution relative des coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole par rapport à ce que l'on obtenait avec des rendements et des charges « fixes ».

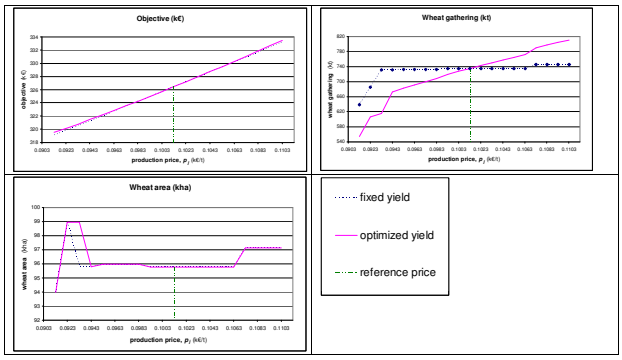


Figure 3. Impact de l'insertion de fonctions de réponse sur la marge brute, la surface en blé tendre, et la collecte de blé tendre d'un groupe type de producteurs.

Conclusion

L'élaboration de fonctions de réponse à l'aide du modèle STICS, associant pour chaque culture et pour chaque exploitation type du modèle AROPAj, le rendement et l'apport en azote, est maintenant possible grâce aux données micro-économiques, physiques et techniques dont nous disposons (Godard et al. 2005b).
Ce travail préliminaire réalisé, le modèle AROPAj a été modifié de façon à intégrer à moindre coût (en matière de temps de calcul, aussi bien qu'en matière de modification du modèle existant) les fonctions de réponse. L'optimisation, formellement non linéaire, est opérationnelle, et le modèle a fait l'objet de premières utilisations pour mesurer l'impact sur les résultats, de l'introduction de fonctions de réponse techniquement réalistes et validées du point de vue agronomique (Godard et al., 2005a).

Bibliographie

Brisson, N., et al., (2003), **An overview of the crop model STICS**, *European Journal of Agronomy*, **18**(3/4), 309-332.
Paris, Q., (1992), **The Vonliebig Hypothesis**, *American Journal of Agricultural Economics*, **74**(4): p. 1019-1028.
Godard C., Bamière L., Debove E., De Cara S., Jayet P.A., Niang B., (2005a), **Interface between agriculture and the environment: integrating yield response functions in an economic model of EU agriculture**, Seminar EAAE, Parma, 3-5 February 2005, 20p.
Godard C., Brisson N., Roger-Estrade J., Jayet P.A., (2005b), **Comment renseigner Les itinéraires techniques à l'échelle des régions européennes ?**, Séminaire STICS, Carry Le Rouet, 17-18 mars 2005, 4p.

Jayet P.A., (actualisation 2004), **AROPAj – manuel pour l'utilisateur**, version pdf, ou htm : http://www.grignon.inra.fr/economie-publique/MIRAjE/doc/manuelaropaj/aropaj.html
Jayet P.A., (2003), **Etude portant sur la réforme de la Politique Agricole Commune (Direction de la Prévision)**, « mémento » version pdf, ou htm ; http://www.grignon.inra.fr/economie-publique/MIRAjE/doc/mementoDP2003/memento/memento.html
Oger, R., **Selection and interpretation of nitrogen fertilizer response functions for cereals**, *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 1994. **29**(3).

Intégration du formalisme de STICS dans un modèle hydrologique distribué : l'exemple de TNT2.

P. Durand*, Z. Saadi, E. Sauboua, L. Ruiz, F. Vertes, J. Salmon-Monviola.

UMR SAS INRA-Agrocampus Rennes,6', rue de St Brieuc ,CS 84215, 35042 Rennes Cedex, France.
*Patrick.Durand@rennes.inra.fr

Introduction

Dans les bassins versants agricoles à nappe superficielle, le paysage se structure entre des hauts de versants où la nappe est à quelques mètres de profondeur, des bas de versant où elle est proche de la surface et une zone intermédiaire où la nappe peut en hiver remonter dans le sol. De ce fait, les temps de transfert du nitrate lessivé vers la rivière dépendent fortement de la position topographique. De plus, le nitrate lessivé dans les parties amont peut réintégrer le sol à l'aval, où il peut être repris par la végétation ou dénitrifié. Ainsi, les flux d'azote à l'exutoire ne sont généralement pas égaux à la somme des fuites parcellaires. On ne peut donc simplement agréger les résultats d'un modèle de culture 1D pour estimer l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux de surface. Pour cette raison, nous avons conçu un modèle intégrant le formalisme de STICS au sein d'un modèle hydrologique distribué maillé, inspiré des hypothèses de TOPMODEL. De cette façon, il est possible de modéliser, à l'échelle du paysage, l'effet de la spatialisation des pratiques culturales, des zones humides de fond de vallée et/ou des réseaux bocagers sur les sorties d'azote nitrique des bassins versants.

Description du modèle integré TNT2 (Topography-based nitrogen transfer and transformations)

Les choix fondamentaux ayant guidé la conception du modèle sont les suivants:

-adopter une description maillée (raster) du système permettant la distribution spatiale des entrées, des paramètres, des processus et des sorties, et un interfaçage aisé avec les bases de données spatiales (MNT, SIG).

-autant que possible, décrire les processus de manière réaliste et assez complète, mais simplifiée (conceptuelle), afin de concilier généricité et facilité de paramétrage et d'utilisation.

-Se baser sur des formalismes reconnus et validés, car le modèle intégré est difficilement validable globalement (trop de degrés de liberté et d'incertitude sur les données).

-Avoir une bonne compatibilité entre la structure et le niveau de complexité des modules hydrologiques et agronomiques.

-Pouvoir réaliser des simulations pluriannuelles pour tenir compte de l'effet mémoire des systèmes considérés.

Lorsque le développement a débuté, en 1996, les meilleurs candidats-modèles satisfaisant ces conditions étaient TOPMODEL pour la partie hydrologique et STICS pour la partie agronomique, mais un important travail d'adaptation était nécessaire pour permettre le couplage.

Pour TOPMODEL, il s'agissait de réaliser une version complètement distribuée, l'original étant semi-distribué et supposant l'homogénéité spatiale des variables d'entrée. De plus, il fallait introduire la modélisation du transport convectif-dispersif du nitrate dans la zone non saturée. Pour STICS, il s'agissait de réduire au minimum les paramètres et les variables pour

permettre une utilisation sur des matrices de 10000 à 50000 mailles, et de permettre les remontées de nappe et les flux latéraux dans le profil de sol.

L'architecture du modèle réalisé est schématisé dans la figure 1.
Les hypothèses de TOPMODEL retenues dans TNT2 sont les suivantes :

- flux en saturé darcyens ;
- gradient hydraulique constant et égal à la pente topographique ;
- Transmissivité hydraulique décroissant exponentiellement avec la profondeur ;
- Dynamique décrite par une succession d'états stationnaires ;

Les transferts en non saturé ont été simulés au moyen d'un modèle à double porosité , avec formalisme de Burns (1974) dans la porosité de rétention. Les échanges entre la porosité de rétention et la porosité de drainage (nappe) se font par mélange partiel. Les remontées capillaires ont été prise en compte selon un formalisme proche de celui proposé par Hillel (1994).

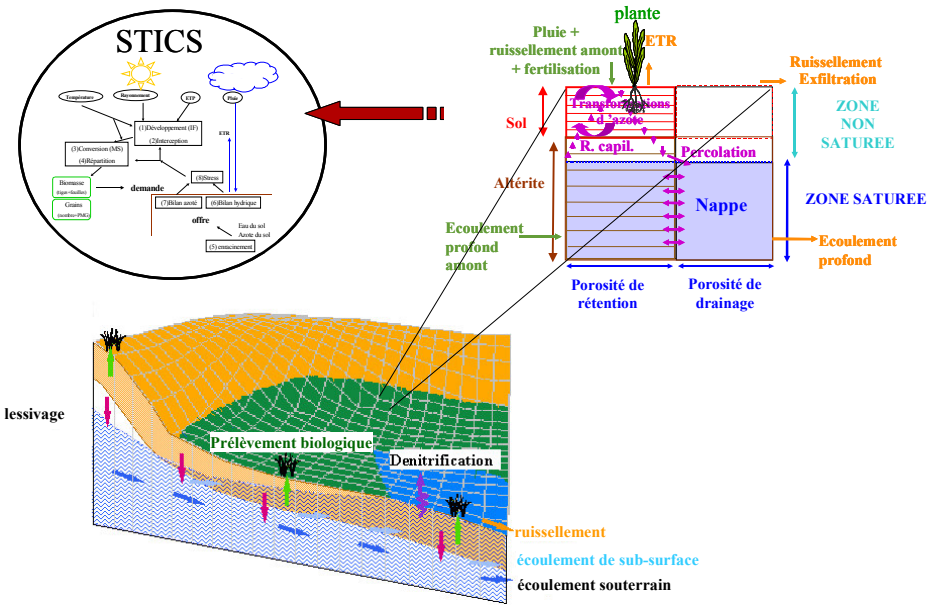


Figure 1 : schéma de principe de TNT2

Les principales simplifications opérées dans le formalisme de STICS sont les suivantes :

-partout ou plusieurs choix de calcul sont proposés, le plus simple a été retenu.
-la levée est simplifiée (pas de prise en compte de la profondeur du semis).
-la croissance aérienne indeterminée par la méthode source-puit n'est pas simulée.
-les modules d'élaboration du rendement ont été fortement simplifiés (calcul massique uniquement).
-le nombre de résidus pris en compte est limité à 3.
-l'irrigation, le mulching ne sont pas modélisés.
-la croissance de la prairie est modélisée par des potentiels de croissance décadaires standard.
-la dynamique de l'azote sous prairie est modélisée différemment (accumulation d'un pool de MO « sequestré » de C/N=15, alimenté par une fraction de la biomasse résiduelle après fauche ou pâturage et par les fèces, s'humifiant pendant la présence de la prairie, puis se décomposant comme un résidu au moment du retournement).
-la discrétisation du sol se fait en couches de 10 cm.

D'un point de vue informatique, l'ensemble du modèle a été codé en langage C sous environnement Linux. Pour le traitement des MNT, des librairies « maison », développées par H. Squividant (logiciel MNTSURF), permettent de définir le routage de l'eau sous forme d'arbres et de graphes. La simulation d'une année sur un bassin versant de 1 km² avec une résolution de 20 m prend environ 5 mn sur un PC actuel.

Exemples de résultats

Dans un premier temps, le modèle a été appliqué à des éléments de paysage schématisés pour évaluer l'importance potentielle des interactions spatiales (localisation des parcelles dans le bassin, dénitrification en zone humide) sur les sorties à l'exutoire en fonction de différents types géomorphologiques (Beaujouan et al., 2001, 2002, 2004). Plus récemment, des applications à des bassins versants réels ont été réalisées. La calibration du modèle sur le bassin versant de Kervidy-Naizin montre l'aptitude du modèle à simuler les flux hydriques et nitriques (figure 2) ainsi que la structuration spatiale des processus (figure 3). Par contre, la variation des concentrations journalière est mal reproduite.

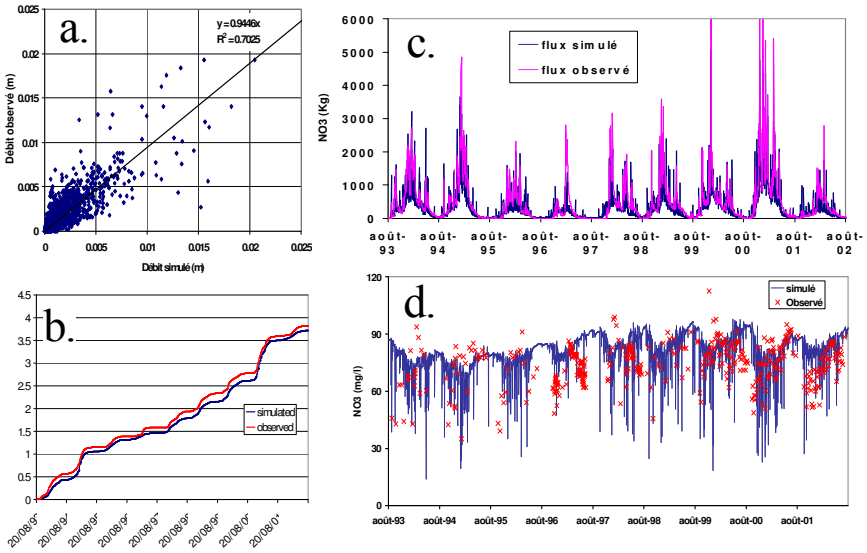


Figure 2 : simulations à Kervidy : régression débits observés vs. simulés (a), flux hydriques cumulés (b), flux nitriques cumulés (c),

Dans une autre application (Viaud et al., 2004, Plouy, 2004), l'effet du réseau bocager sur les flux hydriques et nitriques a fait l'objet de premières estimations. En fonction de sa localisation et de sa densité, le réseau bocager réduit plus ou moins fortement la lame d'eau écoulée et le flux de nitrate associé.

Enfin, une étude réalisée en collaboration avec l'ACTA, l'Institut de l'Elevage, Arvalis et le CEMAGREF a permis d'évaluer l'effet de scénarios de changements de pratiques sur la qualité de l'eau (Durand et al., 2004, Chambault et al., 2004). Les résultats montrent que la baisse des concentrations en nitrate obtenue est très progressive, plus de 20 ans étant nécessaires à la stabilisation. De plus, l'optimisation du système de production actuel (bovin lait intensif) sur le bassin ne permettrait pas d'atteindre des niveaux de concentrations inférieur à 40 mg.l^{-1} , et ce même si le modèle met en évidence une augmentation significative des stress azotés sur les versants (figure 4), malgré un équilibre théorique de la fertilisation.

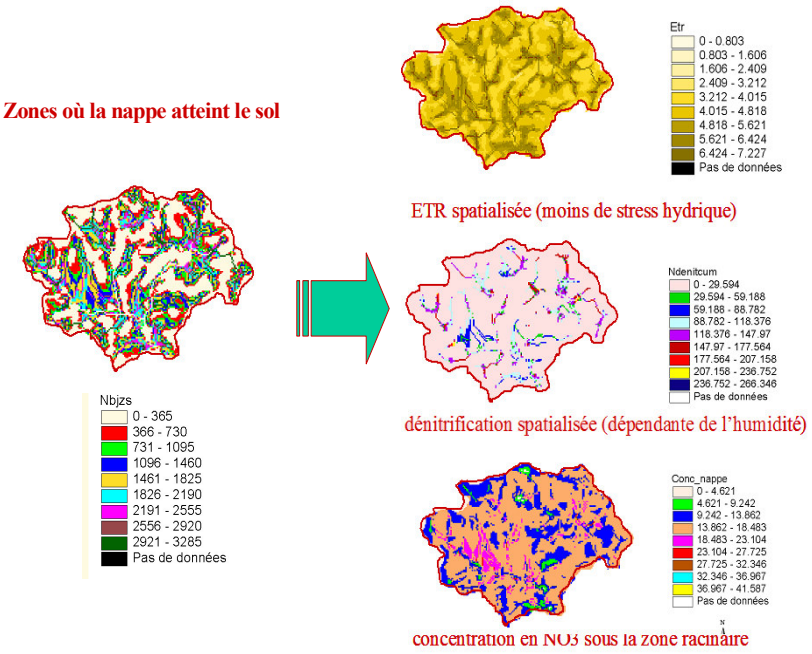


Figure 3 : exemple de sorties spatialisées de TNT2

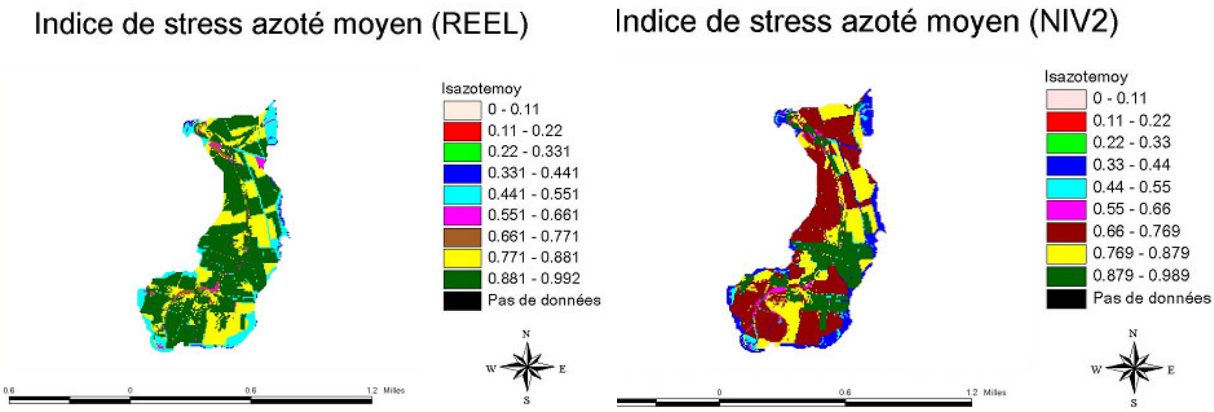


Figure 4 : indices de stress azoté calculés pour le bv de la Fontaine du Theil (35) pour le scénario "réel" et le scénario "optimisé" (Niv 2)

Perspectives

Le modèle continue d'être testé et amélioré, notamment sur le plan de la modélisation des prairies et des haies, sur le plan de la simulation des variations de concentrations journalières, et sur le plan de l'utilisation sur des bassins de plus grande taille (assimilation de données de télédétection, effet de la dégradation de la résolution spatiale…). De plus, une extension du modèle pour la simulation des flux de COD est en cours d'étude (thèse de B. Morel). De nombreuses applications à des fins scientifiques et opérationnelles sont programmées ou en cours.

References

Beaujouan, V., et al. (2001). *Ecol. Model.*, 137, 1, 93-105.
Beaujouan, V., et al. (2002). *Hydrological Processes,*16, 493-507.
Beaujouan, V., et al. (2004). In *: Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux,* Monestiez P., Lardon S., Seguin B. (Ed.), INRA Editions p.99-116.
Chambault, H., et al. (2004) In : *BV Futur - Colloque Interrégional - Savoir et Savoir faire sur les bassins versants. CRAB, Rennes,* p.97-115.
Durand, P. et al.(2004). In : *BV Futur - Colloque Interrégional - Savoir et Savoir faire sur les bassins versants. CRAB, Rennes,* p.205-215.
Plouy, P., 2004. *Mém. DEA. Géosciences Univ. Rennes* 1, 21 p.
Viaud V., et al. (2004). *Agricultural Water Management* 34, 4, 559-573.

Modélisation des interactions arbre-culture par couplage de STICS à un modèle arbre spatialisé 3D : principe et architecture informatique

Christian Dupraz, Isabelle Lecomte
INRA, UMR SYSTEM
Unité Mixte de Recherche sur les Systèmes de Culture Tropicaux et Méditerranéens
Bât 27, 2 Place Pierre Viala, F 34060 Montpellier cedex 1.
Contact : dupraz@ensam.inra.fr

Contexte

Les systèmes de culture agroforestiers associent des arbres et des cultures intercalaires dans les mêmes parcelles. Le succès des parcelles agroforestières dépend étroitement des interactions entre arbres et culture. Un critère d'efficacité des parcelles est le coefficient de rendement équivalent, qui permet de comparer, sur une surface identique, un système associé (arbres et cultures mélangés) et un système assolé (arbres et cultures séparés). Pour mesurer expérimentalement cet indicateur, des expériences pluri-décennales et multi-sites seraient nécessaires. Elles ne sont pas réalisables. C'est pourquoi, dans le cadre d'un programme Européen de recherche (Programme SAFE, voir http://www.montpellier.inra.fr/safe), un travail de modélisation des interactions arbres-cultures a été réalisé. Ce modèle appelé Hi-sAFe doit permettre de prévoir l'évolution conjointe des rendements des cultures intercalaires et de croissance des arbres, sur un horizon de simulation pluri-décennal. Il nécessite le couplage d'un modèle de culture avec un modèle de croissance d'un peuplement d'arbres espacés.

Figure 5: Moisson de placettes expérimentales dans la parcelle agroforestière noyer-blé de Vézénobres dans le Gard (âge des arbres : 8 ans).

L'arbre introduit une hétérogénéité dans la parcelle cultivée: ombre, prospection racinaire, effets microclimatiques (brise-vent ; température et humidité de l'air), retour de litière au sol (feuilles et racines fines), biodiversité accrue (petits mammifères, oiseaux, insectes…). Cette hétérogénéité se traduit par une variabilité spatiale de la culture intercalaire. Inversement, la culture intercalaire peut influencer fortement la croissance de l'arbre. L'ensemble est évolutif, avec la croissance des arbres année après année, et réactif aux fluctuations environnementales. L'agriculteur peut piloter les interactions arbres-cultures : choix des cultures intercalaires appropriées, choix des espèces d'arbres, de la densité et de la disposition des arbres, régime

d'élagage et d'éclaircie, fertilisation localisée ou cernage racinaire des arbres, adaptation des itinéraires techniques sur les cultures, modification des interventions techniques sur les cultures en fonction de la proximité des arbres (agroforesterie de précision). Les principaux processus des interactions sont assez bien connus, mais leur intégration est délicate, surtout sur des horizons de simulation pluri-décennaux. C'est l'objet du modèle Hi-sAFe que d'intégrer ces processus.

Mise en œuvre informatique

Choix de STICS

La modélisation de l'hétérogénéité spatiale de la culture influencée par l'arbre est obtenue par exécution parallèle d'un modèle de culture sur des sous-unités spatiales. Ce type de découpage en grille est permis par la plate-forme de modélisation CAPSIS (De Coligny et al, 2002). Cette plate-forme de modélisation de peuplements forestiers, développée en JAVA, propose un ensemble d'outils génériques pour la description de peuplements d'arbres spatialisés ainsi que pour la gestion et la comparaison de scénarios sylvicoles. L'implantation sous CAPSIS a imposé d'écrire l'ensemble du modèle en JAVA et aucun modèle de culture validé n'existait dans ce langage. Cependant, une bibliothèque spéciale (Java Native Interface) offre la possibilité de communiquer avec des modules externes écrit en C ou C++ et compilés sous forme de DLL. L'existence d'une version C de STICS (Poupa, 2003) a donc été un élément décisif pour retenir STICS comme modèle de culture dans Hi-sAFe, au détriment des modèles DSSAT qui n'existaient qu'en Fortran.

Adaptation de STICS pour Hi-sAFe

Le couplage de STICS et du modèle arbre nous a conduit à résoudre le problème suivant : l'arbre et toutes les instances de la culture doivent échanger des informations au pas de temps quotidien pour la résolution des modules de compétition. Il est donc apparu nécessaire de modifier le mode de déroulement de STICS afin de pouvoir interrompre sa boucle journalière.

Ainsi, la boucle annuelle de STICS a été supprimée afin de ne garder que la boucle journalière. Le programme résultant a été compilé sous forme de DLL afin d'être piloté depuis Hi-SAFE, au jour le jour, sur chaque cellule indépendante constituant la scène à simuler.

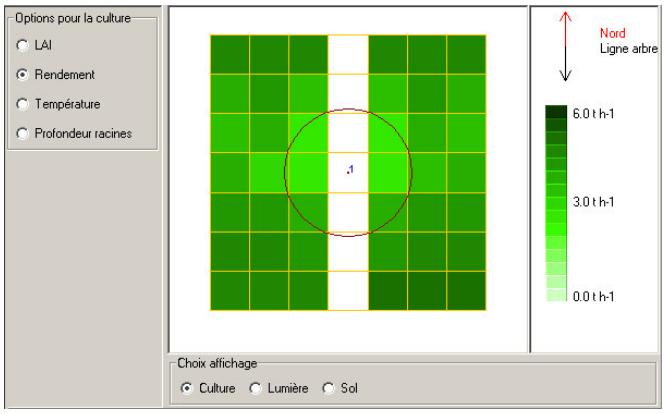


Figure 6 : Scène de simulation HiSAFE où chaque cellule carrée correspond à une instance de STICS (vert=maïs, blanc=sol nu)

Les données communes d'entrée (description géométrique de la scène simulée, variables de commande telles que le climat, initialisation des variables d'état) sont lues par le programme en JAVA et passées ensuite à STICS. On peut ainsi modifier ces entrées pour rendre compte de l'influence de l'arbre sur la culture au pas de temps journalier (redistribution de la pluie, éclairement). Seules les routines de lecture des fichiers de paramètres généraux (param.par) et les paramètres d'espèces (plante.plt) sont restées dans STICS.

Les modules communs décrivant les processus de partage des ressources : lumière, eau, azote sont écrit en JAVA et leurs résultats passés à STICS. Pour cela la boucle journalière de STICS a été séparée en 2 parties (après la routine KETP) afin d'insérer côté HisAFe, le module de répartition de l'eau et de l'azote entre la culture et les arbres. De part sa difficulté d'implémentation, la modélisation du microclimat aérien résultant de l'interaction arbres-cultures n'est pas encore réalisée dans Hi-sAFe.

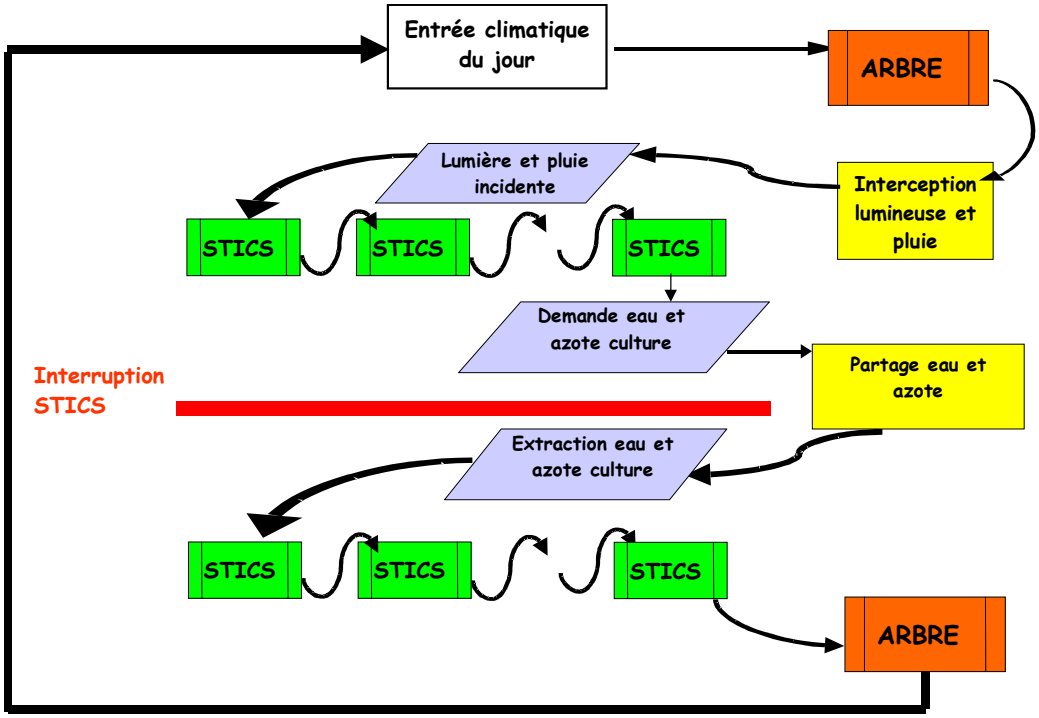


Figure 7 : Boucle journalière de Hi-sAFe montrant les interactions avec STICS

Les routines de calcul de transfert d'eau et d'azote (LIXIV et ABSORBN) ont été laissées dans STICS mais ont été modifiées pour prendre en compte les extractions dues aux arbres. La boucle journalière a été aussi modifiée pour éviter l'exécution de la routine qui calcule l'extraction réelle de la culture (TRANSPI) lorsque ces valeurs ont été déjà calculées dans Hi-sAFe.

La procédure d'enchaînement des années a été entièrement réécrite pour supprimer l'utilisation du fichier recup.tmp. A chaque nouvelle culture, toutes les variables sont réinitialisées sauf les variables d'état du sol et les paramètres généraux. Pour cela les routines d'initialisation ont été complètement réorganisées en 5 parties distinctes :

- InitialGeneral = initialisation des paramètres généraux
- InitialSol = initialisation des paramètres du sol

- InitialPlante = initialisation d'une plante selon l'espèce
- InitialVariables = initialisation de toutes les variables états journalières
- IniClim = Initialisation des variables climatiques

Problèmes de temps d'exécution

Pour communiquer avec JAVA, STICS en C est compilé en DLL, qui n'est chargée qu'une seule fois en mémoire lors de son premier appel. Si la grille de simulation est composée de 400 cellules, STICS sera appelé avec 400 configurations différentes, mais avec un seul exécutable et un seul espace mémoire pour stocker ses variables. Il faut donc conserver dans Hi-sAFe toutes les variables de STICS pour chaque cellule, afin de pouvoir relancer la simulation après chaque interruption.

Dans sa version 5.0 en Fortran, STICS utilisait un « common block » unique, zone mémoire globale regroupant toutes les variables utiles à l'exécution du modèle. Grâce à une intervention de Dominique RIPOCHE à l'automne 2002, ces variables ont été séparées en 7 paquets distincts :

1. Les paramètres généraux et sol (4440 variables)
2. Les paramètres plantes et itinéraires techniques (1718 variables)
3. Les variables de sortie (87 variables)
4. Les variables climatiques (16844 variables)
5. Toutes les autres variables simples (988 variables)
6. Toutes les autres variables sous forme de tableaux de nombres réels (20723 variables)
7. Variables relatives aux cultures associées (849 variables)

Des routines permettant la sauvegarde/restauration de certains de ces tampons mémoire ont été écrites afin de conserver les valeurs des variables d'état des cellules (ou instance de DLL) d'un jour sur l'autre. D'autres tampons n'ont plus à être sauvegardés car ils correspondent à des paramètres stables pour une rotation culturale ou à des variables inutiles à Hi-sAFe. Il reste cependant encore environ 100.000 variables sauvegardées et restaurées tous les jours pour chaque cellule : les tampons 5 et 6 et certains tableaux traités à part contenant des données racinaires – DRL (365 :200) soit 73000 positions !

Dans STICS le sol est découpé en horizons pédologiques eux même redécoupés en mini-couches de 1cm. Dans Hi-sAFe ces mêmes horizons sont redécoupés en voxels d'épaisseur variables (entre 10 et 50 cm environ). Pour des raisons d'espace mémoire nous n'avons pas pu garder le découpage en mini-couches de 1cm. Cette différence de discrétisation a nécessité l'écriture d'un module JAVA d'agrégation des valeurs de mini-couches STICS vers les voxels Hi-sAFe afin de répercuter dans Hi-sAFe les résultats de STICS à savoir :

- Les densité de racines de la culture
- Les teneurs en eau
- Les concentration en azote
- Les extractions d'eau et d'azote de la culture (lorsque ces valeurs n'ont pas été calculées par Hi-sAFe, ce qui est le cas lorsque l'arbre est défeuillé)

Un second module JAVA de désagrégation des valeurs de voxels Hi-sAFe vers les mini-couches STICS a été écrit afin de répercuter dans STICS les résultats de Hi-sAFe à savoir:

- Les extraction d'eau et d'azote des arbres
- Les extraction d'eau et d'azote de la culture

Ces 2 modules sont exécutés tous les jours et pour chaque cellule influencée par les arbres entraînant un ralentissement du temps d'exécution.

Conclusion

Hi-sAFe présente une caractéristique originale : l'exécution simultanée de nombreuses instances parallèles non indépendantes du modèle de culture STICS. Bien que la version actuelle ne prévoit pas d'échanges matière entre les instances parallèles de la cultures (entre les cellules), les cultures ne sont pas indépendantes : elles sont toutes en compétition avec un même compétiteur, l'arbre, et de ce fait elles se forcent les unes les autres : la compétition exercée par l'arbre sur une cellule se traduit par un effet sur toutes les autres cellules.

Le couplage a été réussi grâce à un gros investissement en développement informatique. L'idée de départ était d'utiliser STICS « dans l'état » et de n'y apporter aucune modification pouvant empêcher le passage aux versions futures. Notre problématique de couplage avec interaction au pas de temps journalier était trop complexe pour être effectuée sans s'approprier le code de STICS. Au final, STICS a été profondément remanié et le passage à la version 6 paraît désormais impossible, sauf au prix d'un temps de développement considérable.

La taille des tampons de mémoire est encore beaucoup trop élevée pour permettre des temps de calculs acceptables sur les scènes de plus de 100 cellules. Un tri plus minutieux de ces variables serait un gros avantage pour toute nouvelle problématique de couplage (séparation des variables d'états sol et plante, isolation et tri des paramètres, suppression des tampons mémoire des variables temporaires de calcul, diminution de certaines séries chronologiques qui ne sont utiles qu'en sortie etc…)

Pour réduire le nombre d'instances de STICS calculées, nous avons écrit un algorithme de regroupement des cellules similaires en familles sur des critères multiples. Ceci permet de regrouper par exemple 400 cellules en 10 à 20 familles, réduisant ainsi d'un facteur 20 les temps de calcul. Cet algorithme est opérationel (Marchais, 2003) mais n'est pas compatible simplement avec la procédure de modélisation tri-dimensionnelle de la croissance des systèmes racinaires des arbres, qui est une des innovations majeures de Hi-sAFe. Cela illustre bien la difficulté du couplage entre un modèle unidimensionnel (STICS) et un modèle tri-dimensionnel.

Références

De Coligny F et al (2002). **CAPSIS** Computer-Aided projection for Strategies in Silviculture. Fourth workshop IUFRO, Canada

Poupa J.C. (2003). Présentation de STICS version C, Séminaire STICS 2003, Arles.

Marchais N (2003) Hi-sAFe Clustering , Rapport de stage , INRA Montpellier

Intégration de Stics dans un couplage spatialisé agronomie-hydrologie souterraine sur le bassin de Seine.
Calcul parallele – Application au transfert des nitrates et des pesticides.

N. Flipo, P. Goblet, E. Ledoux, J-M Monget, A. Rat, C. Viavattene* et P. Viennot
Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex,
**Contact de l'auteur présentateur :* chrisvia@cig.ensmp.fr

Application de STICS spatialisé au bassin de la Seine. Simulation du flux de nitrates Afin d'étudier la dynamique du transfert des pollutions azotées à l'échelle du bassin de la Seine tout entier dans le cadre des travaux du PIREN-Seine et du GICC (Ducharne, et al, 2004), les flux moyens annuels sous-racinaires ont été calculés à l'aide de STICS spatialisé (Gomez, et al, 2003) sur une période de 20 ans en utilisant un fichier de données météorologiques couvrant la période 1970-1990 et le fichier des pratiques agricoles moyennes regroupées par zone par l'INRA-Mirecourt (Mignolet et al., 2002) pour la période 1990-2000. Ce schéma de dix années de pratiques agricoles étant juxtaposé à l'identique pour couvrir la période de 20 ans de simulation. L'irréalisme apparent d'un tel scénario tient au fait que l'étude ne portait pas sur une tentative de reproduction du passé de l'évolution des nitrates dans le bassin mais plutôt sur l'évaluation des impacts futurs d'une politique de « laisser-faire » où les conditions de climat et d'exploitation agricole actuelles seraient reproduites indéfiniment.
Le calage du couplage STICS-MODCOU (Monget et al, 2004), a été effectué par comparaison sur la période 1970-2000 entre les concentrations en nitrates simulées dans les nappes et celles mesurées pour les 4442 points de captage de la base de données de l'Observatoire National de la Qualité des Eaux Souterraines (ONQES) enrichis des apports du fichier SISE EAUX (Système d'Information en Santé - Environnement) de la DDASS et dans une moindre mesure du fichier ADES (Banque Nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) géré par le BRGM.
Une méthode de calage statistique basée sur la distance du Chi2 calculée entre la distribution des concentrations par aquifère a permis d'obtenir un calage du modèle couplé sur l'évolution annuelle de la médiane des distributions avec un écart-type de l'ordre de 1 MgNO3/l sur la période 1970-2000. Mais ceci n'a pu être réalisé qu'au prix d'un coefficient de correction multiplicateur ou diviseur appliqué par aquifère à l'ensemble des intrants calculés par STICS pour les pratiques culturales renseignées par zones agricoles homogènes.

La parallèlisation de STICS-MODCOU spatialisé
Dans l'état technique du code STICS-MODCOU tel qu'il avait été mis en œuvre à l'origine, le temps d'exécution du programme STICS spatialisé pour une série de 40 ans au pas de temps journalier en tenant compte de 7 zones agricoles INRA-Mirecourt seulement avait été évalué à 28 jours d'exploitation d'unité centrale. De gros efforts de logiciel ont donc été nécessaires pour rendre réalisable l'étude précédente Le code FORTRAN réalisé initialement pour l'appel des fonctions de STICS en mode spatialisé a donc été parallélisé (Van der Lee et al, 2002). La parallélisation permet l'utilisation simultanée de plusieurs unités de traitement CPU (Computer Processing Unit) pour exécuter le code FORTRAN dans une configuration dite de « cluster » sous LINUX. Les CPUs utilisées peuvent ainsi traiter chacune une UGSM (Unité générale de simulation) du modèle STICS de manière indépendante des autres (Gomez, 2002). Lorsqu'il emploie un « cluster » de 7 CPUs en parallèle, ce nouveau code permet d'effectuer la simulation au pas de temps journalier sur les 12 zones pour 40 ans en deux jours

de calcul. Notons d'autre part qu'au cours de l'année 2004, des modifications dans le code de STICS version 4 ont été apportées suivant les recommandations de l'INRA-Laon

La plate-forme de modélisation CAWAQS

Le logiciel CAWAQS est un nouvel outil, développé récemment, dans le but de répondre aux nouvelles problématiques abordées dans le cadre du PIREN SEINE (Flipo, 2005). Il permet le calcul des apports diffus pour le logiciel PROSE. Pour se faire, plusieurs logiciels de calcul préexistants ont été couplés, voire adaptés, au sein d'une même structure de modélisation intégrant les logiciels REPSUR/STICS/NEWSAM/PROSE afin de représenter explicitement chaque terme du transfert des masses d'eau et des polluants associés, au sein d'un hydrosystème, depuis les sols jusqu'aux cours d'eau en passant par les aquifères. Le couplage avec des bases de données et des Systèmes d'Information Géographique (SIG), dont l'usage se généralise chez les gestionnaires de l'environnement, facilite grandement la mise en oeuvre dans ce type de milieu complexe.

Le développement de STICS PHYTO

Un premier bilan des modèles existants permettant de simuler le transfert des pesticides depuis le sol jusqu'en sortie de la zone racinaire a mis en évidence le fait que si beaucoup de ces modèles simulent le devenir des pesticides dans le sol, peu simulent le transfert au delà de la zone racinaire. Il est donc apparu judicieux de faire évoluer, le modèle STICS en y incorporant une phénoménologie essentielle relative aux pesticides.

Ceci a été réalisé par la mise en place dans STICS d'un modèle de transfert sous racinaire des molécules permettant le suivi annuel de l'évolution des concentrations à l'échelle d'un bassin versant (Rat, 2005) tout en permettant d'étudier la spatialisation de la contamination grâce au couplage avec MODCOU. En parallèle, une campagne de suivi temporel de la contamination des eaux souterraines du bassin de la Vesle a permis de disposer de données homogènes, et interprétables à l'échelle annuelle. La géologie régionale et les pratiques agricoles étant connues, il semble maintenant possible d'identifier différents comportements de molécules dans les eaux souterraines tant d'un point de vue spatial que temporel. Ces données pourront donc mises en valeur dans l'avenir lors de la phase de en validation du modèle STICS PHYTO.

Efforts futurs vers une meilleure intégration STICS-MODCOU

Pour réaliser le couplage entre les résultats fournis par STICS spatialisé et la chaîne MODCOU-NEWSAM, on calcule actuellement (Gomez, 2002) une concentration en nitrates pour chaque maille kilométrique de MODCOU en combinant les flux d'eau délivrés par la couche superficielle MODSUR et les flux d'azote fournis par STICS par zone élémentaire dite UGSM (Organisation spatiale des unités de simulation) déterminée par un découpage spatial « météo-sol-agriculture ». Cette démarche est relativement arbitraire et ne permet pas le calage d'un bilan hydrique rigoureux à l'échelle de chaque maille MODCOU. On s'attachera donc à l'avenir à adapter la spatialisation actuelle de STICS et à réaliser une plus grande intégration entre les codes MODCOU et STICS de façon à réaliser une parfaite coordination spatio-temporelle des flux d'eau traités dans les deux codes.

Références

Ducharne et al, Projet GICC-Seine, Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, *Rapport final, Nov. 2004*, 60 p.

Flipo, N., 2005. Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et en rivière : application au bassin de Grand Morin. *Thèse de doctorat, ENSMP*.
Gomez E. (2002). Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. *Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*.
Gomez E. et E. Ledoux (2003). Etude de l'évolution de la contamination nitrique des aquifères du bassin de la Marne à l'aide d'outils de modélisation. Centre d'Informatique Géologique, Rapport Interne. Mars 2003, 73 p.
Mignolet C., C. Schott, J-F. Mari, M. Benoit. (2002). Typologies des successions de cultures et des techniques culturales dans le Bassin de la Seine – *Rapport d'activité de l'année 2002. Programme Piren-Seine*. 23 p.
Monget J-M., C. Viavattene, P. Viennot., 2004. Simulation au moyen du logiciel STICS-MODCOU des pollutions azotées sur l'Oligocène du Bassin Parisien. Mise en oeuvre et confrontation avec les données de terrain. *Rapport d'activité de l'année 2003. Programme Piren-Seine*.
A. Rat, P.Mercier, E. Ledoux, 2005.Contamination et modélisation des pesticides dans les eaux souterraines du bassin versant de la Vesle. *Rapport d'activité de l'année 2004. Programme Piren-Seine*. 24 p.
Van der Lee J., L. De Windt, V. Lagneau and P. Goblet, 2002 Presentation and application of the reactive transport code HYTEC in: *Computational Methods in Water Resources*, Hassanizadeh,S.M (ed.), 47/2, Developments in Water Science Series, Elsevier, pp. 599-606

Utilisation d'un modèle de culture pour l'évaluation de politiques environnementales : Restructuration algorithmique de STICS

J.C. Poupa[5]
J.P. Amigues[6]
S. Cezera[2]

Introduction

Dans le cadre d'un projet de recherche économique portant sur la gestion intégrée de l'eau à l'échelle d'un bassin versant, on développe un outil de simulation couplant une modèle de culture à un modèle d'optimisation de la conduite de l'irrigation par des exploitants agricoles.

L'outil de simulation doit pouvoir représenter l'utilisation de l'eau par l'agriculture à l'échelle d'un territoire et sur plusieurs campagnes successives à partir de modèles de cultures appliqués sur une parcelle. Ceci suppose de prendre en compte des évènements quotidiens, mais aussi de resituer ces cultures dans un espace géographique sur longue période. Les évaluations élémentaires étant peu coûteuses en ressources informatiques, il est ainsi potentiellement possible de maîtriser ces dimensions spatiales et temporelles.

Cette problématique a été initialisée avec le choix du modèle *STICS*. Après réalisation d'un premier produit pour répondre à la demande du projet, l'objectif est désormais d'aboutir à un système opérationnel destiné aux équipes de recherches, construit avec les composants actuels et futurs du logiciel. Sa réalisation s'inscrit dans une logique pluridisciplinaire, des sciences biotechniques aux sciences sociales en passant par les sciences de l'ingénieur.

Ces résultats sont aujourd'hui utilisables pour redéfinir l'algorithmique de STICS, et le restructurer pour pouvoir intégrer tant la dimension chronologique quotidienne que de nouvelles dimensions spatiales et temporelles.

Méthodes

Les méthodes utilisées visent à reprendre l'existant, soit une plate-forme opérationnelle depuis une dizaine d'années et qui intègre en continu de nouveaux besoins. Il s'agit d'automatiser tout ce qui peut l'être pour pouvoir ensuite, en interaction étroite avec les équipes, valider les algorithmes, puis les intégrer dans des environnements de couplage adaptés.

Le code source du logiciel s'est avéré être suffisamment structuré pour être traité avec des méthodes qui relèvent de *l'informatique théorique*. Des analyseurs ont été réalisés et les compilations ont permis de :

- Reconnaître et restructurer les algorithmes des fonctions d'évaluation ;
- Définir des classes de variables en fonction de la dynamique du modèle et des besoins applicatifs ;

Reconnaissance des algorithmes

Une première étape a permis d'analyser le code Fortran pour reconnaître les algorithmes et les restructurer si nécessaire[7]. Elle utilise la *théorie des langages formels* pour construire

[5] INRA-ESR, 4 allée Adolphe Bobierre, CS61103, 35011 Rennes cedex
[6] INRA-LERNA, 21, allée de Brienne, 31000 Toulouse

[7] J.C. Poupa, *Cstics : Couplage informatique de Stics avec des modèles extrinsèques*, Séminaire STICS, Arles, 2003.

une grammaire algébrique reconnue par un automate, et isoler des séquences à risques, principalement les branchements, rebelles à toute formalisation mathématique.

Classification des variables

Une difficulté majeure résulte de l'existence d'un ensemble non structuré de quelques deux mille variables communes identifiées par leurs noms, qui regroupent paramètres du modèle et variables de simulations. Une seconde étape a permis de construire des classes sur cet ensemble au moyen de la *théorie des graphes* en distinguant :

- Les paramètres du modèle, variables statiques, elles-mêmes réparties dans des groupes avec les constantes, les variables descriptives de la plante, du sol, du climat et des itinéraires techniques ;
- Les variables de simulation, initialisées puis évaluées quotidiennement ;
- Un certain nombre de variables d'édition des résultats ;

Dynamique des variables

La classification précédente a permis de séparer les variables dynamiques, évaluées chaque jour pendant la simulation, des autres variables, invariantes au cours du temps. Les variables étant numérisées, toute fonction appelée quotidiennement peut l'être avec deux paramètres :

- X, vecteur qui regroupe les variables statiques ;
- Y_t vecteur des valeurs des variables dynamiques à la période t, Y_0 étant l'état initial ;

Les vecteurs Y_t sont regroupés dans une matrice, ce qui permet de conserver l'ensemble des séries chronologiques, accessoirement de défaire la simulation du jour en restituant l'état de la veille.

L'art du couplage va alors consister à extraire ou modifier des composantes de ces deux vecteurs, pour gérer des évènements ou partager des ressources.

Résultats

Ce processus de construction a abouti à la production d'une suite de versions adaptées à différents contextes et objectifs à partir de 2003. Il a ensuite été poursuivi, avec le souci permanent de reconstituer les structures syntaxiques classiques des langages informatiques évolués, et de trouver des solutions génériques pour résoudre les problèmes répertoriés plutôt que d'effectuer des corrections à vue. Les produits les plus importants sont les suivants :

Version HiSAFE (INRA Montpellier)

Cette première version a été générée à partir d'une classification des variables proposée pour les besoins du projet HiSAFE, projet européen de modélisation de conduite de culture sous couvert arboré. Elle a été validée pour plusieurs cultures par comparaison automatisée avec les évaluations de la version Fortran du début à la fin de la simulation.

JSTICS, version de référence pour le couplage

Un prototype, *Jstics*, a été développé à partir de la version HiSAFE pour fabriquer des instruments de simulation ciblés pour des équipes de recherches : gestion de l'eau d'irrigation, choix des itinéraires techniques, effet d'un réchauffement climatique...

Cette nouvelle version C utilise les classifications automatisées des variables, les variables statiques étant réparties dans leurs groupes d'appartenance, et l'évaluation du jour t étant faite par la fonction f, traduite formellement par l'affectation $Y_t = f(X, Y_{t-1})$.

L'algorithmique reste celle de la version Fortran mais reprise avec les structures de contrôle des langages algébriques. Le graphe des relations entre variables permet de définir quelles

fonctions modifient quelles variables : il est ainsi possible de suivre les évaluations au pas à pas, y compris les dérives liées à la précision, et même de reproduire des séquences erronées.

Version Fortran

La formalisation mathématique inhérente aux méthodes est indépendante des langages informatiques : une version Fortran restructurée peut ainsi être produite. Une documentation technique détaillée, destinée à des équipes informatiques, journal rédigé en continu, est disponible : les situations ambiguës ou à risques localisées lors des générations des versions C sont signalées dans de nombreuses notes contextuelles de bas de pages.

Perspectives

Ces premières réalisations permettent d'effectuer des couplages dans un environnement de programmation informatique. L'objectif à terme est d'aboutir à une plate-forme de développement multidisciplinaire.

Dans l'immédiat, le traitement de la version 6 de *STICS* nécessite d'enrichir l'analyseur pour prendre en compte les nouvelles structures de données liées aux cultures associées : la génération de la version C équivalente s'effectue comme pour les versions antérieures, avec mise à jour simultanée de la documentation technique.

Simultanément, l'étape de reprise des algorithmes peut démarrer en utilisant les analyses syntaxiques et les classifications. Elle devra s'effectuer avec les équipes concernées dans deux directions.

1. Spécification des algorithmes d'évaluation:

- Définition des fonctions élémentaires et validation ;
- Gestion de la dimension chronologique et synchronisation ;
- Pilotage des évaluations quotidiennes ;
- Optimisation globale et contextuelle ;

2. Construction de bases de données :

- Séparation options, constantes , familles de paramètres, variables de décision, valeurs initiales des variables endogènes ;
- Numérisation et choix des domaines de définition, contrôles ;

Ces spécifications pourront être reprises pour structurer et apurer le code Fortran de *STICS*, afin de maintenir l'actuel support de production de ce logiciel pour les équipes scientifiques : les automates actuels sont ensuite en mesure de produire une version C standard, avec des fonctions utilisables dans des environnements de développement logiciel plus classiques.

Conclusion

L'enjeu est de reprendre la plate-forme *STICS* pour définir l'architecture un système qui puisse intégrer les demandes actuelles et futures de projets de recherches interdisciplinaires. Il ne s'agit pas ici de fabriquer un logiciel avec des interfaces ciblées, mais plutôt de mettre à disposition des équipes de recherches des composants et produits efficaces, pratiquement des ensembles de fonctions et les bases de données utiles.

Ces composants sont évidemment utilisables dans d'autres contextes, y compris chez des partenaires, pour produire des outils logiciels applicatifs.

ArTix : base de données et solution logicielle autour du couplage de Stics et du modèle économique AROPAj

[1.] B. Niang*[1], C. Godard[1], P-A. Jayet[1]

1 - INRA, UMR Economie Publique, BP 01, 78850 Thiverval Grignon, France.
**Email de l'auteur correspondant : binniang@grignon.inra.fr*

Introduction

Face à un volume important de données à traiter pour des milliers de simulations Stics, la base de données et l'application ArTix ont été créées dans le cadre du couplage entre Stics et le modèle économique AROPAj (thèse de Caroline Godard). Ce projet consiste à produire des courbes de réponse à l'azote, des principales grandes cultures européennes, afin d'améliorer la prise en compte de la relation entre intrants azotés et niveau de production au sein du modèle économique. Ceci permettra d'évaluer les impacts de politiques agri-environnementales concernant en particulier, la problématique du changement climatique. Le modèle économique impose l'échelle des exploitations agricoles types (virtuelles, définies statistiquement pour chaque région dont elles représentent la diversité des systèmes de production). Le travail de simulation à l'aide de Stics s'effectue exploitation-type par exploitation-type, culture par culture, et ce pour toutes les régions de l'Union Européenne. Concrètement, il s'agit pour chaque exploitation-type de simuler la réponse à l'azote d'une dizaine de cultures, chacune sur 5 sols de caractéristiques différentes, avec 2 précédents culturaux. Selon la culture, une variété et trois dates de semis ont été considérées (cas du colza, de la betterave, de la pomme de terre et des blés), ou bien trois variétés et une date de semis (cas des maïs et du tournesol). L'irrigation a également été prise en compte (voir les détails de ces itinéraires techniques dans « Comment renseigner les itinéraires techniques à l'échelle des régions européennes ? », Godard et al., ce séminaire). Sont donc effectuées 155 ou 310 simulations par exploitation-type et variété (irrigation ou non, variations des apports azote de 0 à 600 unités/ha) pour chacune des 734 exploitations types.

Les données RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) utilisées par AROPAj et 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. ArTix réalise, en amont de toutes les simulations, la gestion et la mise en forme de l'ensemble des données.

ArTix offre donc un stockage structuré de toute l'information et un regroupement des traitements nécessaires au couplage.

La base de données Artix

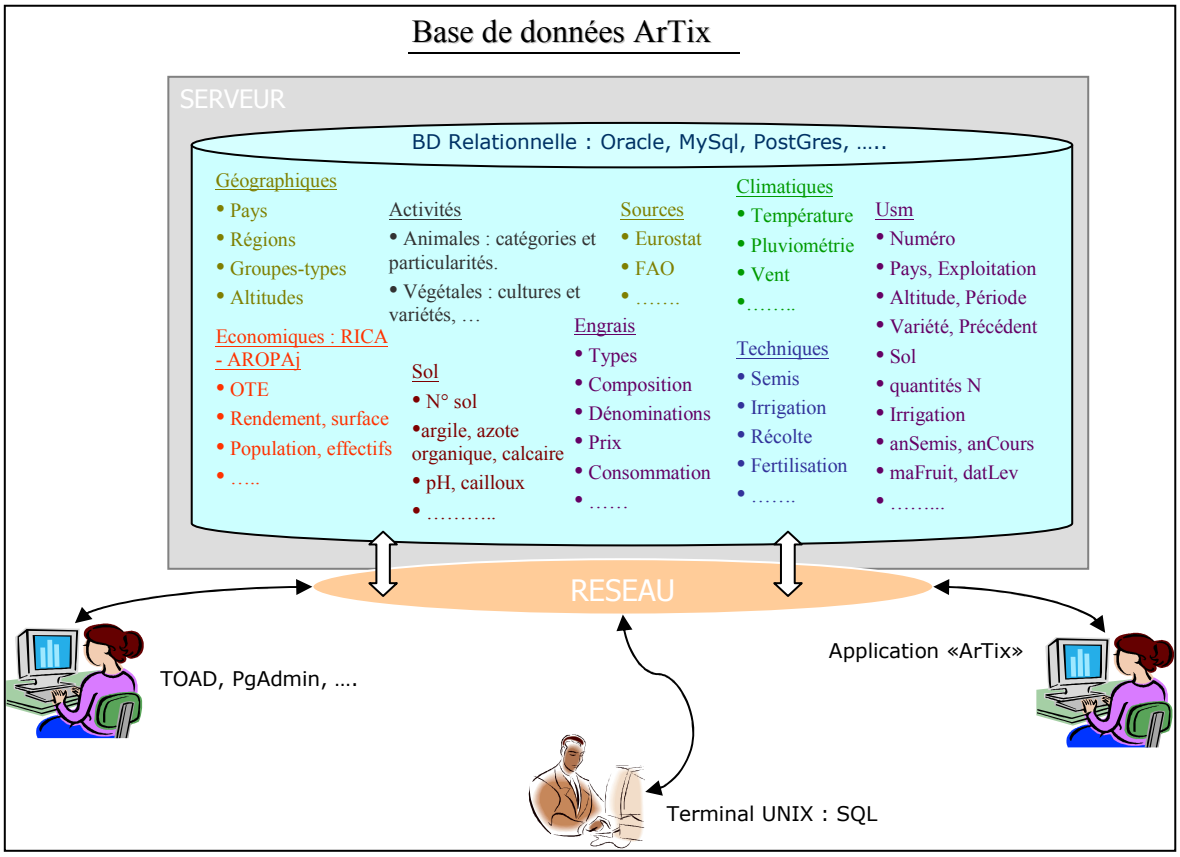
De type relationnel, Artix a d'abord été mise en place sous Oracle, avant d'être migrée sur PostGresql. Elle rassemble les entrées nécessaires à AROPAj d'une part, et d'autre part provenant de base de données fournies par divers partenaires (INRA Orléans, Joint Research Center) et d'autres organisations (Eurostat, FAO, ….). Elle contient les paramètres issus de l'estimation et/ou du calibrage d'AROPAj. La confidentialité statistique des données individuelles du RICA est respectée dans la mesure où ne figurent que les codes régions, respectant en ce sens les règles d'accès aux données individuelles dans le cadre des conventions d'études avec la Commission Européenne.

Pour information, les principales entrées du modèle AROPAj sont la nature des productions animales et végétales, les prix et instruments de la Politique Agricole Commune. Les niveaux

de productions fixés par culture et par exploitation-type, à partir des données RICA, sont aussi intégrés. AROPAj fournit en sortie les surfaces des principales productions, les surfaces gelées, les effectifs des animaux ainsi que la destination des productions. Il en découle les principaux résultats économiques des exploitations, les dépenses en aides directes et indirectes ainsi que certains impacts sur l'environnement. Ces sorties sont exportées sous format txt pour être ensuite intégrées dans la base de données.

La base de données comprend aussi les données régionales utiles à la reconstitution des fichiers indispensables à Stics, par exemple : caractéristiques des sol, données météorologiques journalières, type d'engrais, fractionnement par culture et par région

Ci-dessous une vue schématique du contenu de la base de données :



L'application ArTix

Le logiciel offre une solution multi-plate-forme à l'automatisation du couplage entre AROPAj et Stics. Son architecture s'appuie sur un modèle Client/Serveur accédant à une base de données relationnelle. Les composantes de l'application font appel au langage de développement Java et à Sql, langage de manipulation de bases de données.

La couverture fonctionnelle de ArTix comprend :

- La connexion/déconnexion aux bases de données (ArTix et autres sources de données préalablement définies).
- La collecte des informations :
  - Des programmes spécifiques permettent la lecture des données économiques (RICA, AROPAj) présentées sous forme de fichiers txt possédant une structure fixe.

Il est aussi possible de lire certains fichiers d'entrées/Sorties format Stics afin de renseigner les tables correspondantes de ArTix (param.sol, fichiers .sti).

- Un programme générique est aussi disponible afin de charger directement un ensemble de données à partir d'un fichier formaté suivant la structure de la table concernée (une ligne comprend les valeurs d'un enregistrement séparées par un ;).
- A partir de l'application, l'utilisateur peut directement se connecter à une base externe afin de choisir une table dont le contenu est à charger dans celle d'ArTix choisie (données météorologiques, sols).
- Enfin, des fenêtres de mise à jour sont disponibles pour des saisies individuelles (géographiques, engrais, données techniques, …).

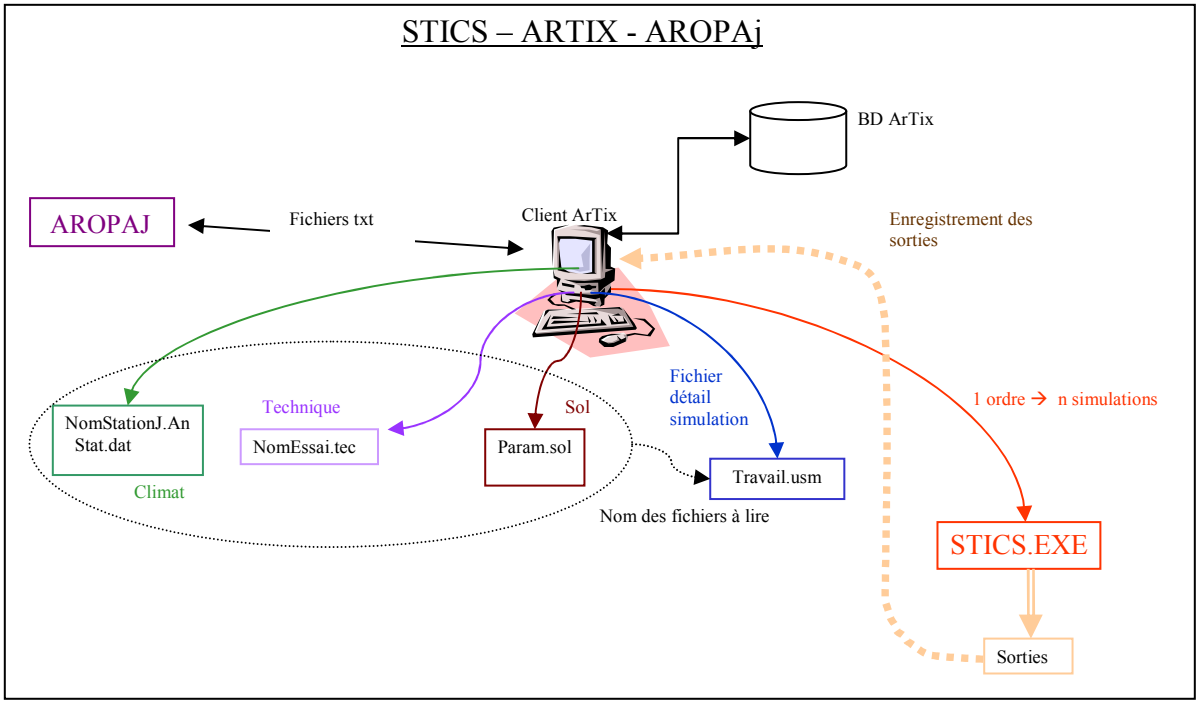
- Génération automatique de fichiers Stics régionaux : sols (Param.sol), climatiques par altitude (nomStation.AN et stat.dat), techniques (NomFichier.tec), de simulations (Travail.usm) au format attendu par le modèle Stics. Ces fichiers, créés à partir de la base pour chaque exploitation-type et variété de chaque culture simulée, ne nécessitent pas un reformatage via WinStics.
- Simulations Stics avec choix du pays ou région ou exploitation, des cultures (le choix de la culture suffit à lancer la simulation de toutes ses variétés prédéfinies), de la culture servant de précédent, d'un intervalle de valeur pour la quantité d'azote (sous forme organique et/ou minéral). 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. Lors de simulations avec précédent cultural, le fichier recup.tmp est sauvegardé et est pris en compte pour la simulation finale.

  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 ceux présentant des erreurs de simulations ; pour ces derniers, les fichiers history sont conservés afin d'identifier le problème.

  Un premier calibrage permet de prendre en compte les simulations (entrées/sorties) et de constituer des fichiers à soumettre à AROPAj ; cette étape permet d'identifier les entrées définitives de Stics pour chaque culture et chaque exploitation-type. Ces critères servent à d'autres runs stics lancés pour les différentes sources d'azote possibles (engrais, fumier, lisier ou fientes).
- Consultation des données présentes et export 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 (Param.sol, *.tec, *j.AN, *.usm) peuvent aussi être générés.

ArTix fonctionne aussi bien sous Unix que Windows, et son architecture est prévue pour s'intégrer dans un réseau de données ou pour une utilisation en local.

Ci-dessous un schéma récapitulatif des échanges entre Stics, ArTix et AROPAj :


STICS – ARTIX - AROPAj
BD ArTix
AROPAJ
Fichiers txt
Client ArTix
Enregistrement des sorties
Fichier détail simulation
1 ordre → n simulations
Technique
Sol
NomStationJ.An Stat.dat
NomEssai.tec
Param.sol
Travail.usm
Climat
Nom des fichiers à lire
STICS.EXE
Sorties

Coupling STICS to the ISBA SVAT model to assess crop canopy processes from remote sensing data

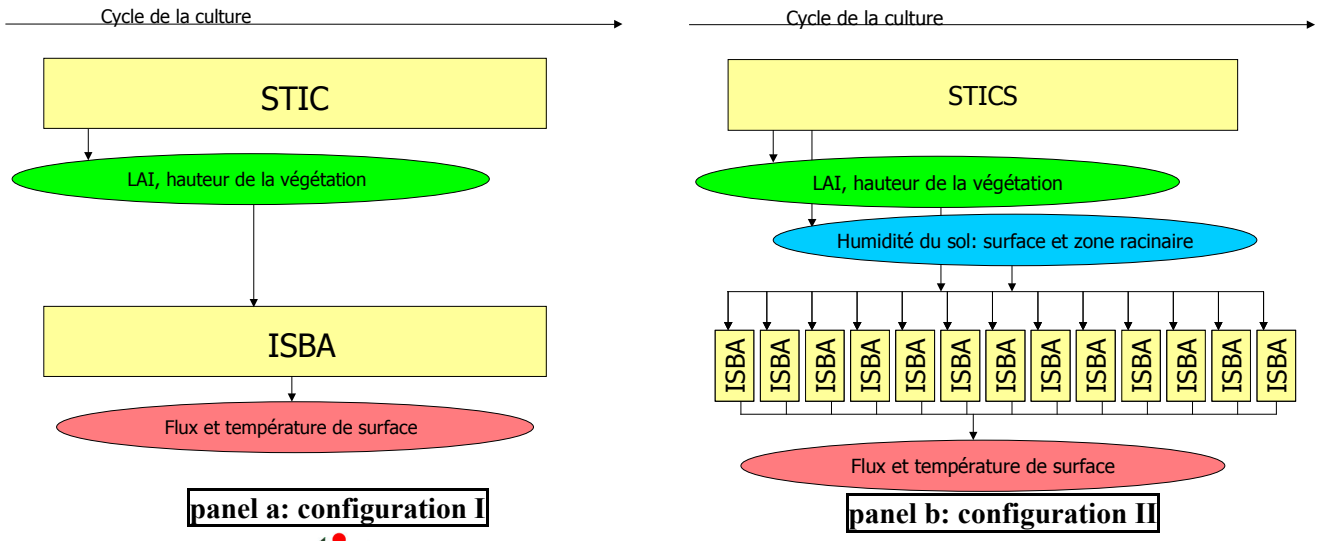
A. Olioso (*), Y. Inoue (**), P. Lecharpentier (*), J.-P. Wigneron (***), S. Ortega-Farias (****), J.-C. Calvet (*****) and O. Inizan (*)
INRA, Climat, Sol et Environnement, F84914 Avignon Cedex 9, France ; **NIAES, Remote Sensing Laboratory, Tsukuba, Japan ;*INRA, Ephyse, Bordeaux, France, ****SIAR, Universidad de Talca, Chile, *****CNRM, Météo-France, Toulouse, France*
(Address correspondence to olioso@avignon.inra.fr)

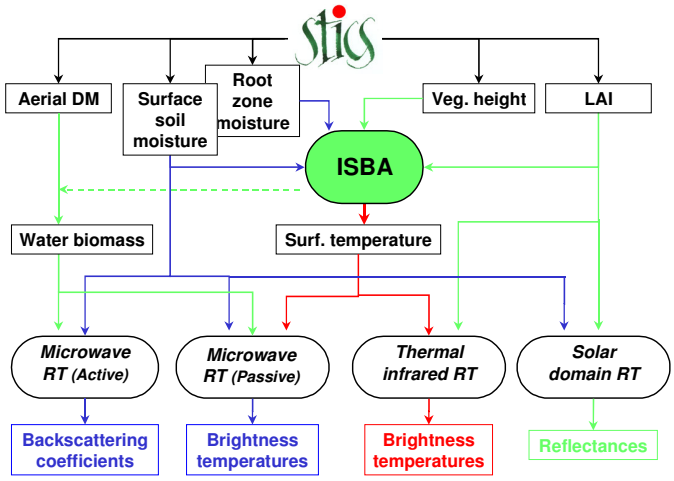
INTRODUCTION

Crop growth models describe processes regulating crop production. Remote sensing may be used to control these models when some model parameters are unknown, or in order to correct model drifts. Most of the studies devoted to assimilation of remote sensing data into crop models focused on the use of visible and near infrared reflectances or radar measurements. Indeed, these measurements give information on crop structure and biomass seasonal dynamics. Works by [1], [2] and [3] presented the possibility of assimilating reflectances and/or radar measurements into crop models. One may think that thermal infrared (TIR) data can also provide significant information on crop processes when water limitations occur. However, it is not easy to assimilate such data because crop models don't usually describe the energetic processes that determine surface temperature and because of the inadequacy between their time step, usually the day, and the fast time response of these processes [4]. In this study, as in [4], we proposed to use a soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) model as an interface between growth models and thermal infrared data: SVAT models describe canopy energy balance with an adequate time step for interpreting thermal infrared measurements. Such reasoning may also be drawn when one is interested in simulating any processes that occurs at a time step lower than the daily time step of the crop model (such as leaf photosynthesis, stomatal regulation, turbulent heat flux, surface soil processes...).

COUPLING THE MODELS

The canopy functioning model used is this study is the STICS model [5], developed to simulate a wide range of crops. Its main outputs comprised the primary production, the yield components, as well as the nitrogen and water balances of the soil-crop system, at a daily time step. We also used the ISBA SVAT model [6] which was first implemented as a land surface scheme in Météo-France atmospheric weather forecast model and GCM. This model solved the surface energy balance and the soil water balance with a five minute time step. The main surface variables simulated by ISBA that were considered in this study, were the surface temperature, the soil moisture in the root zone, the surface soil moisture, the energy fluxes and the CO_2 flux. This model required LAI and vegetation height as inputs. The coupling between the two models was implemented using an object oriented modeling platform that allowed exchanges of information between the models. Several configuration of coupling were made available as shown in Figure 1. In the first configuration (Fig. 1a), only two variables, LAI and vegetation height, were transferred from STICS to ISBA (it may be also possible to transfer root depth). In the second configuration (Fig 1b), LAI and vegetation height, as well as surface and root zone soil moistures simulated by STICS, were transferred to ISBA to be used as initial values for each simulation day. In this case, the management of soil water by ISBA was overcame by STICS. This was not the case in the first configuration, both models having their own management of soil moisture. In order to simulate remote sensing data, simple radiative transfer models were added to the system as illustrated in Figure 1c for configuration II.





panel c: configuration II + radiative transfer models

Figure 1: Schemes of coupling the crop model (STICS), the SVAT model (ISBA) and the various radiative transfer (RT) models. A Beer-Lambert type model was used for simulating NDVI from LAI [7]. Simulation of thermal infrared brightness temperature was done by combining the emissivity model given by [8] and the procedure in [9]. Additional simulations were performed in the microwave domain using water cloud (backscattering) and τ-ω (emission) models as proposed by [10] and [11] (see [12]). These two models used the vegetation integrated water content (estimated from LAI or dry biomass out of STICS) and the surface soil moisture as input. Surface temperature from ISBA was also used for computing microwave emission.

TEST OF THE COUPLED MODEL

Simulations with the coupled model in configuration II were performed in the conditions of a soybean experiment done in 1990 in Avignon [13]. STICS-ISBA-RT simulations exhibited a good agreement with the experimental data as well for data simulated by STICS, such as crop structure and production, as for data simulated by ISBA such as evapotranspiration on the daily basis and latent heat flux on an hourly basis (Table I and Figure 2). Good simulations of NDVI (STICS + RT) and thermal infrared brightness temperature (STICS + ISBA + RT) were also obtained. Simulations of microwave quantities were also in agreement with experimental data (results presented in [12]).

The coupled crop-SVAT-radiative transfer model was run in configuration II for various initial root-zone water contents, ranging from wilting point to field capacity. Figure 2 exhibit the high sensitivity of remote sensing signals to initial water content (Wi). The sensitivity of vegetation growth was also very high and impacted evapotranspiration (ET), latent heat flux (LE) and final water reserve. Increase in NDVI (at the beginning of the crop cycle, or when initial soil moisture was increased) was mainly due to vegetation amount changes (increases). Thermal infrared signals were more difficult to interpret, since they also reflected the evolution of meteorological conditions such as the amount of incident radiations and the current air temperature. TIR signal response to Wi was related both, -*i)* to the increase in vegetation amount, which reduced the effect of soil surface dryness by covering the soil and which explored the soil deeper by increasing the root depth (Table I), and –*ii)* to the increase in available water.

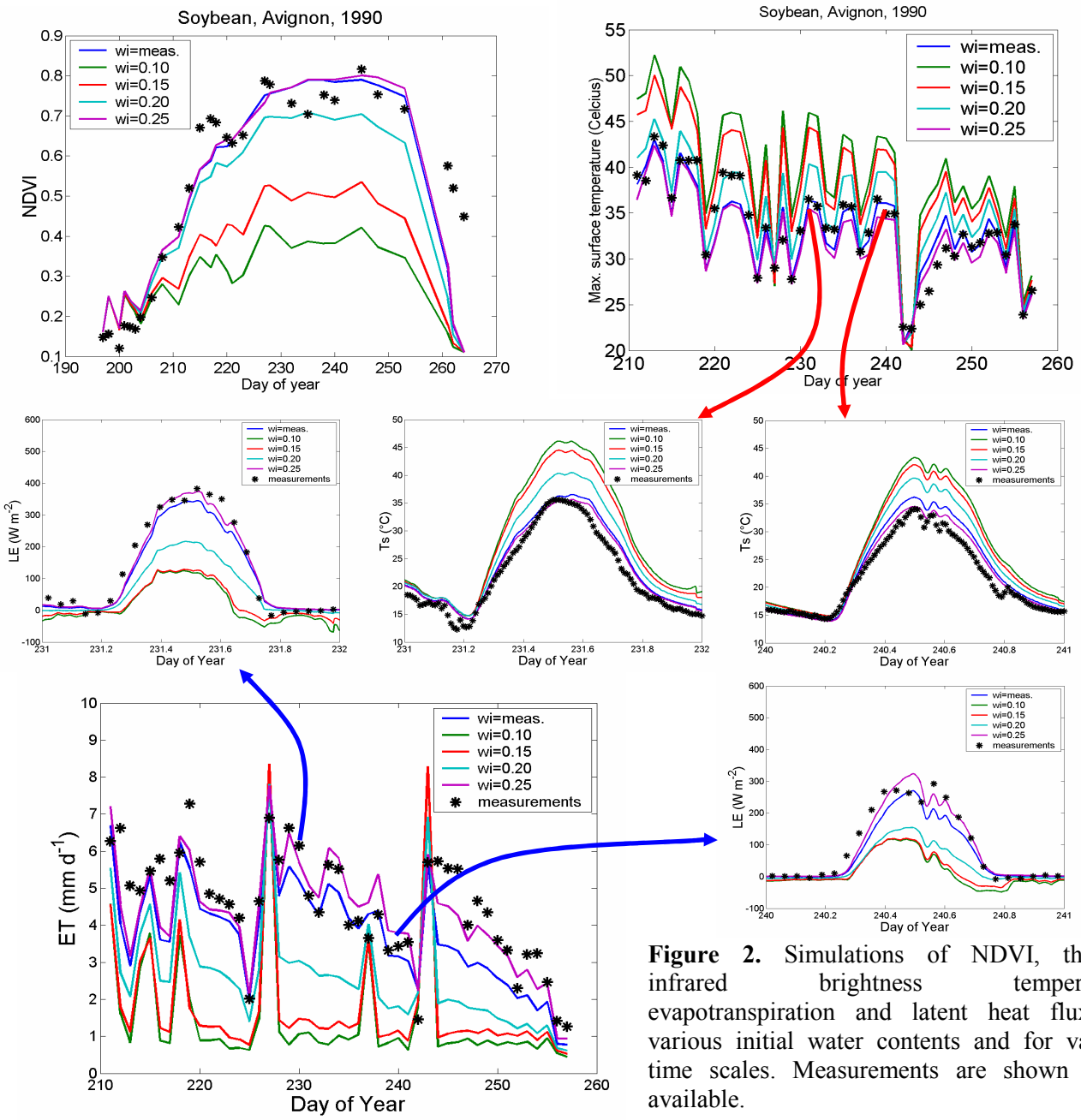


Figure 2. Simulations of NDVI, thermal infrared brightness temperature, evapotranspiration and latent heat flux for various initial water contents and for various time scales. Measurements are shown when available.

Initial root zone water content (kg kg^{-1})	Final biomass (t ha^{-1})	Maximum LAI	Maximum root depth (m)	Yield (t/ha)	Initial and final water reserve (mm)	RMSE for LE (W m^{-2})	RMSE for ET (mm d^{-1})	RMSE for NDVI	RMSE for IR temperature (K)
Measurements	**6.62**	**3.9**	**1.4**	**2.85**	**520 – 373**				
Measured Wi	6.51	4.15	1.54	2.77	520 – 348	63	1.11	**0.114**	**1.84**
Wi = 0.10	0.60	0.78	0.86	0.27	218 – 197	139	3.49	0.291	5.95
Wi = 0.15	1.49	1.29	1.28	0.65	330 - 294	132	3.25	0.226	4.91
Wi = 0.20	4.73	2.76	1.49	2.19	442 – 332	101	2.27	0.131	2.75
Wi = 0.21	5.49	3.39	1.57	2.53	464 – 337	88	1.89	**0.118**	2.41
Wi = 0.22	5.94	3.88	1.59	2.74	486 – 334	77	1.56	**0.116**	2.09
Wi = 0.23	6.41	4.13	1.59	2.77	509 – 340	67	1.25	**0.114**	**1.92**
Wi = 0.24	6.86	4.19	1.59	2.77	531 – 351	59	1.01	**0.113**	**1.89**
Wi = 0.25	7.18	4.20	1.59	2.77	553 – 363	54	0.80	**0.112**	**1.94**

TABLE I

STICS-ISBA-RT SIMULATIONS AS A FUNCTION OF INITIAL SOIL WATER CONTENT (Wi) AND COMPARISON OF SIMULATED VARIABLES TO MEASUREMENTS (RMSE is the root mean square error; LE is the latent heat flux; ET is the daily evapotranspiration; the case noted as 'measured Wi' used the measured water profile at the start of the simulation (around 0.24 kg kg^{-1}).

We compared NDVI and TIR simulations obtained at the various initial soil moistures to the measurements (Table I). It appeared that RMSE decreased while Wi increased until Wi reached a value around 0.24 kg kg^{-1} (0.21 for NDVI and 0.23 for TIR if we considered that measurement

errors cannot allow us to distinguish a better resolution than 0.01 for NDVI and 0.2 degree for TIR, which in both cases was very optimistic). This value was in agreement with the measured initial water content. It is worth noting that when Wi varied between 0.21 and 0.25 kg kg^{-1}, yield changed only a little (less than 10 %). For biomass larger variations occurred (around 30 %). This initial analysis will be the basis for further analyses aiming to demonstrate the potential of assimilating remote sensing data such as TIR measurements into crop models (e.g. in order to assess crop production).

CONCLUSION

We presented and tested a coupling system between a crop model, STICS, a SVAT model, ISBA, and radiative transfer models in four of the spectral domain classically used in present remote sensing technology. The aim of the coupling was to access to variables at a finer time scale (instantaneous, hourly) than the original time scale of the crop model (daily). Our primary goal was to be able to simulate remote sensing signals such as thermal infrared or passive microwave which are related to surface processes with a highly marked diurnal cycle (energy balance). This coupling has a potential for implementing assimilation of such remote sensing data in crop models and then to analyze possible complementarities between various remote sensing systems. A secondary goal was to be able to describe surface processes at their significant time scale. Then it may be possible to analyze surface energy and mass exchanges with a time step in agreement with the dynamic of atmospheric processes in relation to crop production, CO_2 cycle and crop management such as included in STICS. It must be noticed that none of the classical SVAT models which are currently used to describe surface processes in climate and CO_2 atmospheric modeling really has the ability of accounting for crop management. This may be source of large errors when trying to evaluate the effect of crops on global cycle of carbon and water (see [14]). At the moment, the presented coupled system is only one way (STICS -> ISBA -> RT). However, the use of remote sensing data assimilation will make it possible to return information from RT and SVAT models to the crop model. The possibility of integrating crop, SVAT and RT transfer processes together in a real multi-way coupling will be investigated in the frame of the SEVE project [15].

REFERENCES

[1] H. Chauki, L. Prévot, D. Troufleau, N. Brisson, A. Olioso, F. Baret, and M. Guérif. Assimilation of ERS and RadarSat SAR observations within STICS crop growth model. In *Proceedings of the CEOS SAR Workshop*. Toulouse, Octobre 1999. ESA SP-450, pp. 485-490. 2000.

[2] B.A.M. Bouman. Crop modelling and remote sensing for yield prediction. *Nederlands Journal of Agricultural Science, 4*3, 143-161. 1995.

[3] S. Moulin, A. Bondeau, and R. Delécolle. Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing,* 19, 1021-1036. 1998.

[4] P. Cayrol, L. Kergoat, S. Moulin, G. Dedieu, A. Chehbouni. Calibrating a coupled SVAT / vegetation growth model with remotely sensed reflectance and surface temperature. A case study for the HAPEX-Sahel grassland sites. *Journal of Applied Meteorology,* 39, 2452-2472. 2000.

[5] N. Brisson, B. Mary, D. Ripoche, et al. 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, 1*8, 311-346. 1998.

[6] J. Noilhan and S. Planton. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117, 536-549. 1989.

[7] M. Weiss and F. Baret. Evaluation of canopy biophysical variable retrieval performances from the accumulation of large swath satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 70, 293-306. 1999.

[8] C. François, C. Ottlé, and L. Prévot. Analytical parameterization of canopy directional emissivity and directional radiance in the thermal infrared. Application on the retrieval of soil and foliage temperatures using two directional measurements. *International Journal of Remote Sensing.* 18: 2587-2621. 1997.

[9] A. Olioso. Estimating the difference between brightness and surface temperature for a vegetal canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72, 237-242. 1995.

[10] J.P. Wigneron, A. Chanzy, J.C. Calvet, and N. Bruguier. A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields. *Remote Sensing of Environment*, 51, 331-441. 1995.

[11] J.P. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Olioso, P. Bertuzzi, and A. Chanzy. A simple approach to monitor crop biomass from C-band radar data. *Remote Sensing of Environment*, 69, 179-188. 1999.

[12] Olioso, A., Inoue, Y., Wigneron, J.P., Ortega-Farias, O., Lecharpentier, P., Pardé, M., Calvet, J.C., Inizan, O.. Using a coupled crop-SVAT model to assess crop canopy processes from remote sensing data. In *IGARSS 2001*. Juillet 2001, Sydney, Australie, IEEE Publications. CDRom : paper 171.pdf, 3pp.. 2001.

[13] A. Olioso, H. Chauki, J.P. Wigneron, P. Bertuzzi, A. Chanzy, P. Bessemoulin, and J.C. Calvet. Estimation of energy fluxes from thermal infrared, spectral reflectances, microwave data and SVAT modeling. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, 24(7), 829-836. 1999.

[14] S. Gervois. Les zones agricoles en Europe: évaluation de leur rôle sur les bilans d'eau et de carbone à l'échelle de l'Europe; sensibilité de ces bilans aux changements environnementaux sur le vingtième siècle. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI. 2004.

[15] Chanzy, A., Braud, I., Dedieu, G., Olioso, A. et coll,. Présentation du projet de plate-forme de modélisation des paysages du programme SEVA : place des modèles de culture. Séminaire STICS, Carry Le Rouet, 17-18 mars 2005, INRA. 2005

Spatialisation de Stics dans le cadre d'un couplage avec le modèle de la biosphère terrestre Orchidee

Y. Meurdesoif, S. Gervois, P. Smith, N. Viovy, N. de Noblet-ducoudré
e-mail: yann.meurdesoif@cea.fr

Introduction

ORCHIDEE est un modèle de surface continentale et de biosphère terrestre développé au sein de la communauté climatique française. Il simule les échanges d'eau et d'énergie entre l'atmosphère et les surfaces continentales, ainsi que le cycle du carbone. Il inclut une représentation de la végétation à l'échelle globale permettant de tenir compte de l'influence des grands écosystèmes (forêts, prairies naturelles…) dans les flux et bilans d'eau et de carbone. Néanmoins, ORCHIDEE a des difficultés à simuler correctement les surfaces agricoles qui représentent une part importante de la superficie dans certaine région du globe. STICS, code développé à l'INRA, est par ailleurs capable de simuler la croissance spécifique de la végétation agricole en fonction des paramètres climatiques à l'échelle de la parcelle.

Afin d'améliorer les simulations d'ORCHIDEE sur les surfaces cultivées, nous avons donc envisagé de coupler les deux modèles. ORCHIDEE, via un forçage ou un couplage avec un modèle de circulation générale atmosphérique (LMDZ), fournit les paramètres climatiques pertinents nécessaires à STICS (ensoleillement, température, pluviosité) et en retour, ce dernier fournit un panel de données (indice foliaire, indice de stress azoté, profil racinaire, hauteur de végétation , etc.) qui se substituent aux valeurs calculées par ORCHIDEE pour ces types de végétation.

Dans le suite de ce résumé, nous allons exposer les moyens techniques mis en œuvre pour parvenir au couplage de ces deux codes, en particulier les remaniements effectués dans le code de STICS, ainsi que la technologie de couplage employée. Pour l'ensemble de ce travail, nous nous sommes basés sur la version 4 de STICS.

Mise en oeuvre

1. Spatialisation de STICS

ORCHIDEE travaille simultanément sur toute la surface maillée du globe et impose des pas de temps de l'ordre de la journée pour le module de simulation de la végétation. Or STICS effectue des pas journaliers, mais sur une unique parcelle. Il a donc été nécessaire de remanier le code de STICS de façon à le faire travailler sur un ensemble de points géographiques, tout en gardant un pas de temps journalier.

La solution retenue pour « spatialiser » STICS de la manière la plus transparente consiste à ajouter une dimension supplémentaire à l'ensemble des variables du code contenue dans les « common » fortran. Ainsi les variables simples deviennent des tableaux dimensionnés au nombre de points géographiques sur lequel STICS travaillera, et les tableaux se voient ajouter une dimension supplémentaire. Cette transformation s'effectue à l'aide d'une judicieuse phase de pré-processing sur le code originel de STICS.

Par ailleurs, la structure du code a été quelque peu modifiée, la routine principale du code (**`subroutine princip`**) ayant été coupée en deux. On trouve maintenant une routine d'initialisation (**`subroutine init_stics`**) chargée de la lecture des fichiers de paramétrage, et de l'initialisation des variables du code. On trouve ensuite la routine

(**`subroutine boucle`**) effectuant la simulation de la croissance de la culture sur un pas de temps d'une journée, ceci sur l'ensemble des points géographiques. Cette routine sera appelée journalièrement par le coupleur. Elle accepte en argument d'entrée des tableaux contenant les valeurs d'ensoleillement, de température moyenne et de pluviométrie sur l 'ensemble des points géographiques de la journée en cours. Cette routine renvoie au coupleur différents tableaux de valeurs (indice foliaire, hauteur de végétation, etc..) qui seront ensuite retransmis à ORCHIDEE pour effectuer la suite de ses calculs.

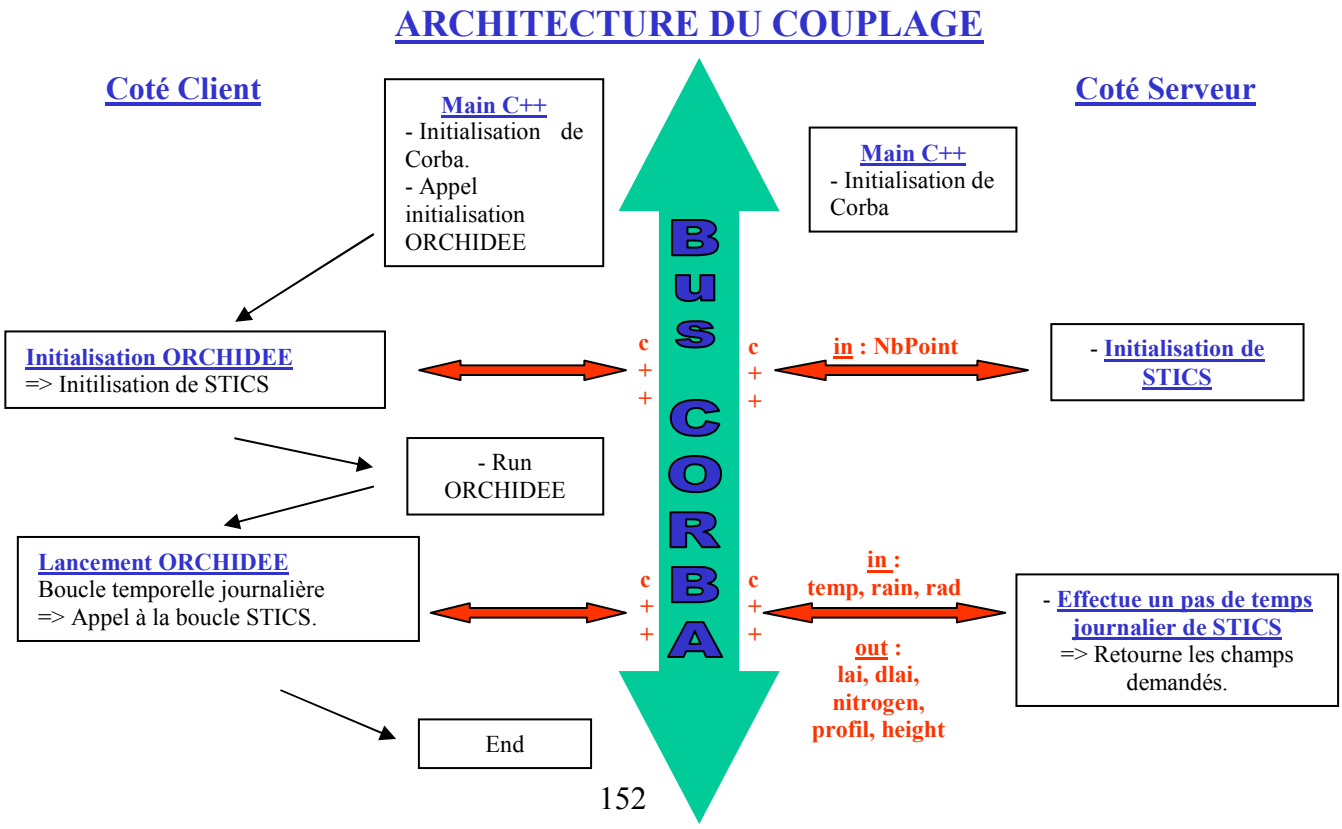
2. Mise en œuvre du coupleur

Il est souhaitable de pouvoir coupler différents modèles agricoles simultanément puisqu'une maille d'ORCHIDEE peut contenir des surfaces agricoles de différentes natures. Pour une première expérience, nous avons choisi de coupler ORCHIDEE à des cultures de blé et de maïs, mais nous avons été très rapidement amené à ajouter le soja. Le couplage doit donc être extrêmement modulaire de façon à pouvoir, dans le futur et au gré des besoins, ajouter différents modèles de végétation sans surcoût important de travail. Pour effectuer ce couplage, nous avons retenu une technologie orientée client-serveur basée sur CORBA.

CORBA est une architecture logicielle spécifiquement orientée client/serveur, permettant l'invocation de routines à distance (RPC – Remote Proceduring Call) vers un autre code sur la même machine ou à travers le réseau. Le principal intérêt de CORBA réside dans sa grande souplesse concernant l'interopérabilité des échanges quelque soit l'architecture matérielle et logicielle, et son approche orienté objet le rend extrêmement modulaire.

STICS a donc été interfacé pour jouer le rôle de serveur CORBA et ORCHIDEE le rôle du client. A chaque modèle spécifique (blé, maïs, soja…) correspond un serveur STICS, interrogé tous les pas de temps journalier par le code client ORCHIDEE, qui récupère ainsi les paramètres nécessaires à la suite de son calcul.

La principale contrainte dans la réalisation de ce couplage est la nécessité d'encapsuler les routines invoquées (**`subroutine init_stics`** et **`subroutine boucle`**) dans une interface C++, CORBA n'ayant pas le fortran comme langage de projection.

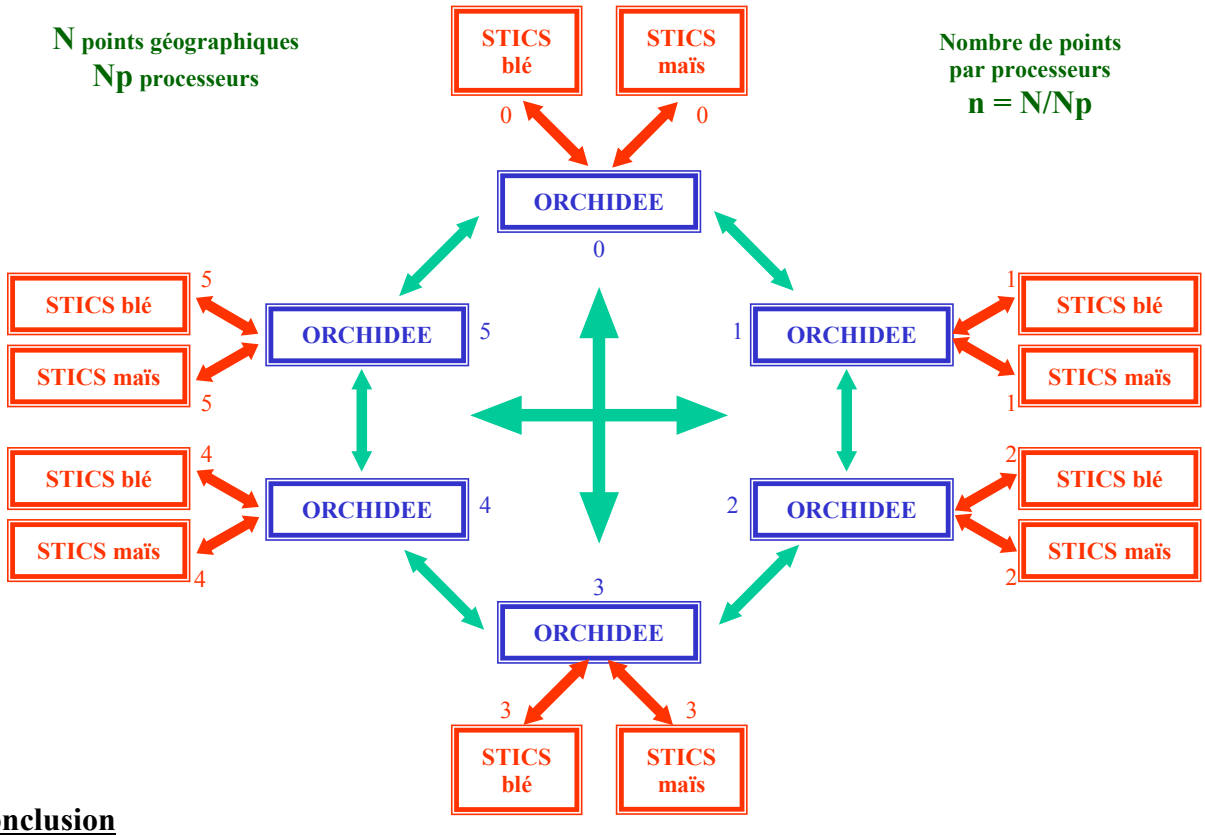


3. La parallélisation du couplage

ORCHIDEE tourne couramment sur supercalculateurs et exploite toutes les possibilités de parallélisme de ces machines dans le but de réduire les temps de restitution des calculs. Le couplage a également été conçu de manière à sauvegarder le potentiel du parallélisme.

La version parallèle d'ORCHIDEE fonctionne en distribuant les calculs sur chacun des processeurs mis à disposition. Chaque processeur effectue ses calculs sur les mailles géographiques qui lui ont été attribuées de manière équi-répartie. Les communications inter-processeurs sont peu nombreuses et utilisent la bibliothèque MPI (Message Passing Interface). Pour maintenir le parallélisme et garantir un bonne scalabilité, nous avons associé à chaque processus MPI du code ORCHIDEE, un serveur STICS pour chacune des cultures (voir schéma).

Lors de l'initialisation, chaque client ORCHIDEE initialise les serveurs STICS en spécifiant le nombre de mailles géographiques sur lesquelles les calculs seront effectués. Les serveurs allouent ensuite dynamiquement les tableaux de données qui leur seront nécessaires et attendent d'être appelés au prochain pas de temps.**Maquette du couplage parallèle**



Conclusion

Le couplage STICS-ORCHIDEE est aujourd'hui pleinement opérationnel et est activement utilisé par les chercheurs du LSCE. Les résultats obtenus montrent une nette amélioration des simulations par rapport à l'utilisation d'ORCHIDEE seul. Les résultats scientifiques issus de cette étude seront présentés dans le poster de P. Smith.

La souplesse de l'architecture du coupleur nous permettra, pour les études futures, de coupler aisément d'autres modèles de végétation, et d'agrandir le champ des variables qui seront retournées à ORCHIDEE.

Pour réaliser ce couplage, la majorité du temps a été investi dans la spatialisation de STICS. Or les versions de STICS évoluent, et le travail est aujourd'hui à refaire sur les nouvelles versions. Un point important de discussion serait donc déterminer comment pérenniser le travail entrepris afin que nos modifications puisse être intégrées dans les futures versions de STICS.

5. Itinéraires techniques

Animateur table ronde : M. Benoit

Les innovations (cultures associées, non-labour,…), comment renseigner les ITK à l'échelle régionale, adaptation des ITK aux changements climatiques, ITK comme sortie du modèle

Comment renseigner Les itinéraires techniques à l'échelle des régions européennes ?

C. Godard*[1], N. Brisson[2], J. Roger-Estrade[3], P-A. Jayet[1]

1 - INRA, UMR Economie Publique, BP 01, 78850 Thiverval Grignon, France.
2 – INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
3 - UMR d'Agronomie INRA-INA P-G Grignon, BP 01, 78850 Thiverval Grignon, France.
**Email de l'auteur correspondant :* caroline.godard@grignon.inra.fr

Contexte et échelle de travail

Afin de mieux évaluer, à l'échelle européenne, l'impact des mesures de politique agricole, les modèles micro-économiques doivent mieux intégrer les relations entre intrants et productivité. Les fonctions de réponse à l'azote des rendements sont des entrées essentielles pour le modèle économique AROPAj dans la détermination des assolements et des niveaux de production optimaux (voir description du modèle économique [2]). Ainsi, nous avons utilisé le modèle STICS pour simuler les relations entre apports azotés et rendement des grandes cultures en Europe. L'échelle régionale est imposée par ce modèle économique basé sur des fermes–types représentant les différents systèmes de production à l'intérieur de chaque région de L'Union. Définies statistiquement, ces fermes-types sont des entités virtuelles construites à partir de données de nature comptables issues du RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole), observées dans chaque région (surface, assolements, cheptel,…). Afin de définir les entrées nécessaires à STICS, il a donc fallu compléter ces informations comptables par des conditions de sol et de climat. Celles-ci proviennent de la carte européenne des sols au millionième, et de la base de données du projet MARS du JRC d'Ispra, Italie. Ne disposant que de l'OTE (Orientation Technico-Economique) de chaque ferme type, nous avons dû, pour définir les Itinéraires Techniques de chaque culture nécessaires à la simulation par STICS, bâtir un certain nombre de règles de décision.

Ainsi, en nous basant sur les informations disponibles dans la bibliographie, complétées à dires d'experts, nous avons défini et attribué les entrées requises par STICS pour simuler les cultures de chaque région de l'Union Européenne à 15. Après avoir précisé les cultures sur lesquelles nous travaillons, nous nous proposons ici de présenter quelques unes de ces règles de décision concernant (i) le positionnement du cycle cultural (groupes de précocité et dates de semis), (ii) la gestion de la fertilisation azotée minérale et organique et (iii) l'irrigation.

Les cultures étudiées

Les cultures étudiées ont été définies à partir des activités de productions végétales du modèle économique ce sont les principales grandes cultures européennes. Cependant, d'un point de vue agronomique, une activité de production végétale peut recouvrir plusieurs réalités. Les blés tendre et dur sont bien distingués, ainsi que les maïs ensilage et grain. Par contre, l'activité « orge » comprend aussi bien les orges de printemps que d'hiver, fourragères que brassicoles, l'activité « pomme de terre » ne distingue pas les plants, des pommes de terres de consommation, féculières ou primeurs. S'ajoutent aux cultures déjà citées : le tournesol, le colza et la betterave à sucre, qui posent moins de problèmes dans la mesure où leur aire de répartition est plus réduite et le nombre de types variétaux utilisés plus faible.

La position du cycle cultural

Afin d'adapter la position du cycle de chaque culture au climat de chaque région, nous avons utilisé deux « leviers » principaux : la précocité et les dates de semis. Suivant le type de

culture, nous avons soit fixé le groupe de précocité et fait varier la date de semis, soit fixé la date de semis et fait varier la précocité.
La première stratégie a été adoptée pour des cultures comme le colza. Pour cette culture en effet, la précocité intervient très peu dans le choix variétal et ce sont surtout les dates de semis qui différencient les régions. En pratique, nous avons retenu une variété moyenne (la seule disponible dans STICS) pour toutes les régions européennes et considéré trois dates de semis possibles (autour d'une date de semis moyenne, issue des données des instituts techniques et de la base de données du projet MARS). Cette attitude est raisonnable dans la mesure où l'aire de culture du colza est cantonnée principalement au Nord de l'Europe. Nous avons procédé de la sorte pour l'orge d'hiver, l'orge de printemps, la pomme de terre et la betterave à sucre.
La seconde stratégie a été adoptée pour le maïs, culture pour laquelle la précocité est déterminante dans le choix variétal. En pratique, trois groupes de précocité ont été retenus parmi les données de l'atlas agroclimatique du maïs (Lorgeou et al. 2003 [4]) et des résultats de l'étude [5]. La date de semis a été fixée à partir de la base de données du projet MARS. Cependant, pour les pays situés plus au Nord ou plus au Sud de l'Europe, il a fallu paramétrer des groupes de précocité non utilisés en France : « ultra précoce » (1550 degrés-jours du semis à la maturité pour le Nord de l'Angleterre), ou « ultra tardif 1, 2 et 3 » (respectivement 2133, 2200 et 2400 degrés-jours du semis à la maturité).
Pour chaque groupe de précocité, nous avons dû calculer pour STICS les paramètres clefs du cycle. Nous nous sommes basés sur la méthodologie donnée dans [1]. Un exemple de paramétrage est fourni tableau 1 pour le groupe de précocité « ultra tardif 3 ».

Abréviation	Mode de Calcul	Durée
PLT FLO	**Définition du groupe : connue**	1200 °J
LEV MAT	**Définition du groupe : connue**	2320 °J
LEV AMF	1/3×(LEV LAX)	347 °J
AMF LAX	LEV LAX – LEV AMF	704 °J
LAX SEN	0.75(FLO MAT) + LAX FLO	970 °J
SEN LAN	SEN MAT *(hypothèse MAT à 32 % eau)*	300 °J
LEV DRP	LEV MAT – FLO MAT + FLO	1370 °J
DRP MAT	LEV MAT – LEV DRP	950 °J

Tableau 1 : Exemple de paramétrage du groupe de précocité du maïs « ultra tardif 3 », adaptée aux conditions du Sud de l'Europe.

Végétatifs (indice foliaire)	Organes récoltés
PLT : semis ou plantation	
LEV : levée	
	FLO : floraison (début sensibilité au gel des fruits)
AMF : accélération maximale de croissance foliaire – fin de phase juvénile	**DRP** : début remplissage des organes récoltés
LAX : indice foliaire maxi	
SEN : début de sénescence	
LAN : indice foliaire nul	**MAT** : maturité physiologique

Tableau 2 : Définition des stades de développement

La fin du cycle est caractérisée soit par un critère de teneur en eau maximale du grain (céréales, oléagineux), soit par la maturité physiologique combinée à une date de récolte butoir (pomme de terre et betterave).

La fertilisation azotée

Nous avons distingué les apports d'engrais synthétiques des apports d'effluents d'élevage potentiels, en fonction du cheptel. Pour chaque plante, nous avons considéré un fractionnement « optimal » de la dose totale en engrais, satisfaisant au mieux les besoins en azote de la plante, et défini à partir de données bibliographiques et à dires d'experts. Ces dates d'apport ont été exprimées en unités de développement de manière à s'affranchir des dates calendaires tout en s'adaptant au mieux à la diversité des conditions climatiques de l'Europe. Le fractionnement de la dose totale dépend du niveau même de cette dose. Un exemple des règles de décision adoptées pour le colza est présenté dans le tableau 3.

Dose totale apportée (Dt)	Règles pour le fractionnement de la Dose Totale (Dt)
Dt < 80,	**un seul apport** au stade boutons accolés (C2-D2, soit 1225 degrés-jours pour la variété retenue (Goéland)
80 ≤ Dt ≤ 120	**2 apports** : **60** à la reprise, soit 1258 degrés-jours pour la variété retenue **Dt-60** au stade boutons accolés
120 < Dt ≤ 180	**2 apports** : **70** à la reprise **Dt-70** au stade boutons accolés
180 < Dt ≤ 210	**2 apports** : **80** à la reprise **Dt-80** au stade boutons accolés
Dt > 210	**3 apports** : **80** à la reprise **40** au stade boutons séparés, soit 1369 degrés-jours pour la variété retenue **Dt-120** au stade boutons accolés

Tableau 3 : Apports d'azote issu de l'engrais minéral pour le colza : dates et fractionnement en fonction de la dose totale (toutes les doses sont données en unités d'azote/ha).

Parallèlement aux apports d'engrais minéral, les effluents d'élevage potentiels de la « ferme-type » constituent la deuxième source d'azote. Connaissant le cheptel et sa composition (en nombre et catégories d'animaux) pour chaque ferme-type, nous en avons déduit (en appliquant des ratios de production moyens annuels) des « stocks » d'effluents à épandre sur l'ensemble de l'assolement de la ferme. En raison de leur teneur très différente en azote et de la nature des contraintes agronomiques spécifiques à chacun d'entre eux, nous avons distingué quatre grands types d'effluents : le stock « lisiers », le stock « fumiers », et deux stocks « effluents de volailles » (fumier, lisier et fientes sèches, regroupés en un seul groupe). Pour l'épandage de ces effluents, nous avons dû définir des règles d'action portant sur la dose (définition d'une fourchette pour la quantité apportée en une fois) [3]. L'épandage de chacun de ces stocks se fait selon un ordre d'affectation prioritaire par culture, en commençant par les surfaces cultivées valorisant le mieux chaque effluent, il est présenté dans le tableau 4. Ces règles ont également été établies en tenant compte d'une série de contraintes agronomiques (par exemple risque de brûlure des feuilles lié à l'apport de fientes de volailles sur maïs, cf. [3]). Enfin les périodes d'apport ont été définies, par culture, en fonction du type d'effluent (tableau 4).

Ordre de priorité				
Culture « réceptrice »	**lisiers bovins, porcins**	**fumiers bovins, porcins, ovins, caprins**	**lisiers et fientes volailles**	**fumier volailles**
blé et autres céréales d'hiver	**1**	**3**	**1**	**3**
maïs grain et ensilage et autres cultures de printemps	**2**	**1**	**2**	**1**
colza d'hiver	**3**	**2**	**3**	**2**
prairies temporaires et permanentes	**4**	**4**	**JAMAIS**	**JAMAIS**

Périodes d'apport				
Culture « réceptrice »	**lisiers bovins, porcins**	**fumiers bovins, porcins, ovins, caprins**	**lisiers et fientes volailles**	**fumier volailles**
blé et autres céréales d'hiver	printemps avt épi 1cm	Automne avant labour	printemps avt épi 1cm	printemps avt épi 1cm
maïs grain et ensilage et autres cultures de printemps	au labour (env. 10-15 J avt le semis)	le plus tôt possible fin d'été (juil-aout)	au labour (env. 10-15 J avt le semis)	au labour (env. 10-15 J avt le semis)
colza d'hiver	avt semis (qq j)	Automne au labour	avt semis (qq j)	avt semis (qq j)

prairies temporaires et permanentes	n'importe quand	n'importe quand	JAMAIS	JAMAIS

Tableau 4: Règles de décision concernant l'apport des différents types d'effluents

Ces règles permettent de créer pour chaque ferme-type en fonction des sources d'apport azoté (minéral, organique) un itinéraire de fertilisation cohérent.

L'irrigation

Connaissant la surface irriguée totale de chaque ferme-type, et la surface de chacune des cultures de chaque ferme, nous avons cherché à « répartir » la surface irriguée entre chacune d'elles. Pour cela, nous avons établi, à dires d'experts, un ordre de priorité vis-à-vis de l'irrigation des cultures. Pour la culture à irriguer en premier d'après cet ordre, si la surface irriguée disponible permet de couvrir l'ensemble de la surface cultivée, alors on considère que la culture est irriguée, que tous ses besoins en eau sont satisfaits, et on déduit de la surface irriguée de l'exploitation celle que l'on vient d'allouer. De proche en proche, on répartit ensuite la surface restante entre toutes cultures de l'exploitation. Pour la dernière culture à irriguer, dont la surface entière ne peut être couverte par la surface irriguée restante, on considère deux options : une culture menée en sec, et une culture irriguée dont les besoins en eau sont satisfaits entièrement. Le statut définitif de ce type de culture est ensuite tranché dans une dernière étape où intervient la prise en compte des critères économiques (voir détail de la méthode dans [2]). Lorsque q'une culture est irriguée, on considère que ses besoins en eau sont toujours comblés par l'irrigation (le paramètres de STICS *ratiol* égale 1) : le mode de calcul automatique des irrigations de STICS est activé (le paramètres *dosimx*, dose apportée à chaque tour d'eau valant 50 mm).

Conclusion

A partir d'hypothèses et des règles qui adaptent les raisonnements agronomiques habituellement faits à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole, on a pu, en utilisant des données et des fermes statistiques, renseigner des itinéraires techniques à l'échelle des régions de l'Europe. Ces itinéraires techniques permettent une modélisation de la réponse à l'azote des principales grandes cultures européennes qui est cohérente avec les observations statistiques du RICA.

Références bibliographiques

1 - Brisson, N., et al., *STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize.* Agronomie, 2002. **22**(1).

2 - Godard, C., et al. *Interface between agriculture and the environment : integrating yield response functions in an economic model of EU agriculture*. in *89th EAAE Seminar: Modelling agricultural policies: state of the art and new challenges*. 2005. Parma (Italy): A paraître.

3 - Institut de l'élevage, et al., eds. *Fertiliser avec les engrais de ferme*. 2001. 104.

4 - Lorgeou, J. and Souverain, F., eds. *Atlas agroclimatique du maïs*. 2003, Arvalis Meteo France. 112.

5 - Ruget, F., et al., *Délimitation de zones équivalentes en France et dans la Communauté Européenne pour optimiser les réseaux d'expérimentation des variétés, maïs, résultats complets*, in *Etude pour le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation*, INRA and AGPM, Editors. 1995. p. 41.

Simulation du fonctionnement des Cultures associées orge-pois

G. Corre-Hellou*, M.L. Faure, N. Brisson, Y. Crozat

ESA, Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale et Agronomie, 55 rue Rabelais,49007 Angers Cedex7, France.
**g.hellou@groupe-esa.com*

Introduction

Une association peut être définie comme la culture simultanée de deux espèces ou plus sur la même parcelle durant un cycle cultural (Willey, 1979). Cette pratique fréquemment rencontrée dans les pays tropicaux n'est pas très répandue dans les pays du Nord mais elle fait l'objet d'un regain d'intérêt en Europe lié à l'émergence des préoccupations d'économie d'intrants, de meilleure efficience des facteurs de production et de préservation de l'environnement. Ainsi les associations céréale-légumineuse se développent en Europe dans les systèmes à faibles intrants en particulier en agriculture biologique. Plusieurs travaux ont mis en avant plusieurs avantages des associations céréales-légumineuse : amélioration de l'utilisation des ressources, gains de rendement par rapport aux cultures pures correspondantes, amélioration de la stabilité des rendements, réduction des pertes de rendements par les adventices et maladies (Jensen, 1996 ; Hauggaard-Nielsen, 2002). Toutefois les performances de ces associations restent très variables en fonction du milieu et il est difficile de prévoir notamment la part de chaque espèce dans le rendement final. Le recours à la modélisation apparaît un outil incontournable pour mieux prédire les performances de ces associations dans des situations pédoclimatiques variées et tester différentes stratégies. Sur la base du modèle mis au point pour les cultures pures, une version associée de STICS a été créé initialement pour simuler le fonctionnement d'associations tropicales (Brisson et al, 2004). Après un paramétrage de STICS pour les cultures pures de pois et d'orge de printemps, le modèle associé a été testé pour la simulation du fonctionnement d'associations pois-orge.

Matériel et Méthodes

La version culture pure du modèle STICS a été tout d'abord paramétrée pour le pois et l'orge. Ce paramétrage a été ensuite testé pour la simulation de combinaisons pois-orge avec la version cultures associées. Les données expérimentales servant à la détermination des paramètres du pois et de l'orge et celles servant au test de la version associée sont issues principalement d'expérimentations menées en 2002 et 2003 à la station expérimentale de la FNAMS à Brain sur l'Authion (49). Le pois pur (variété Baccara) a été semé à 80 pl m^{-2} et l'orge pure (Scarlett) à 120 en 2002 et 250 pl m^{-2} en 2003. Les associations, semées en rangs alternés, étaient composées de 80 pl m^{-2} de pois et 40 pl m^{-2} d'orge en 2002 et 40 pl m^{-2} de pois et 125 pl m^{-2} d'orge en 2003. En 2003, les différents modalités ont été cultivées avec ou sans un apport d'azote au semis (130 U). Le sol contenait au semis 22 kg ha^{-1} d'N minéral sur 0-70 cm en 2002 et 71 kg ha^{-1} en 2003. Les essais ont été conduits sur sol sableux en 2002 et argilo-limoneux en 2003. Les essais ont été conduits en conditions hydriques non limitantes (irrigation pilotée par suivi de tensiomètres).
Des mesures hebdomadaires de croissance aérienne, d'indice foliaire, de quantité d'N accumulée, de %Ndfa (pourcentage d'N issu de la fixation symbiotique déterminé par la méthode de l'abondance naturelle avec l'orge pure comme référence), de quantité d'N dans le

sol ont été effectuées. La profondeur d'enracinement a été également suivie en début de cycle par la méthode des herbicides (Corre-Hellou et Crozat, 2005).

Ces mesures ont permis le paramétrage des différents modules. D'autre part, deux modifications dans les formalismes ont été réalisées. Un lien entre la fixation symbiotique et la croissance végétative a été introduit ainsi qu'un lien entre la croissance racinaire et la croissance aérienne.
D'autre part des modifications de la version associée ont été réalisées afin de rendre possible les inversions de dominance (en terme de hauteur du couvert) au cours du cycle.

Résultats

Des premiers résultats montrent que le paramétrage réalisé permet de simuler convenablement dans les associations l'indice foliaire, la croissance, l'accumulation d'N des deux espèces associées et la fixation symbiotique du pois tout au long du cycle. La figure 1 montre des résultats satisfaisants pour deux situations contrastées de part la densité de chaque espèce dans l'association et la disponibilité en azote minéral au semis.

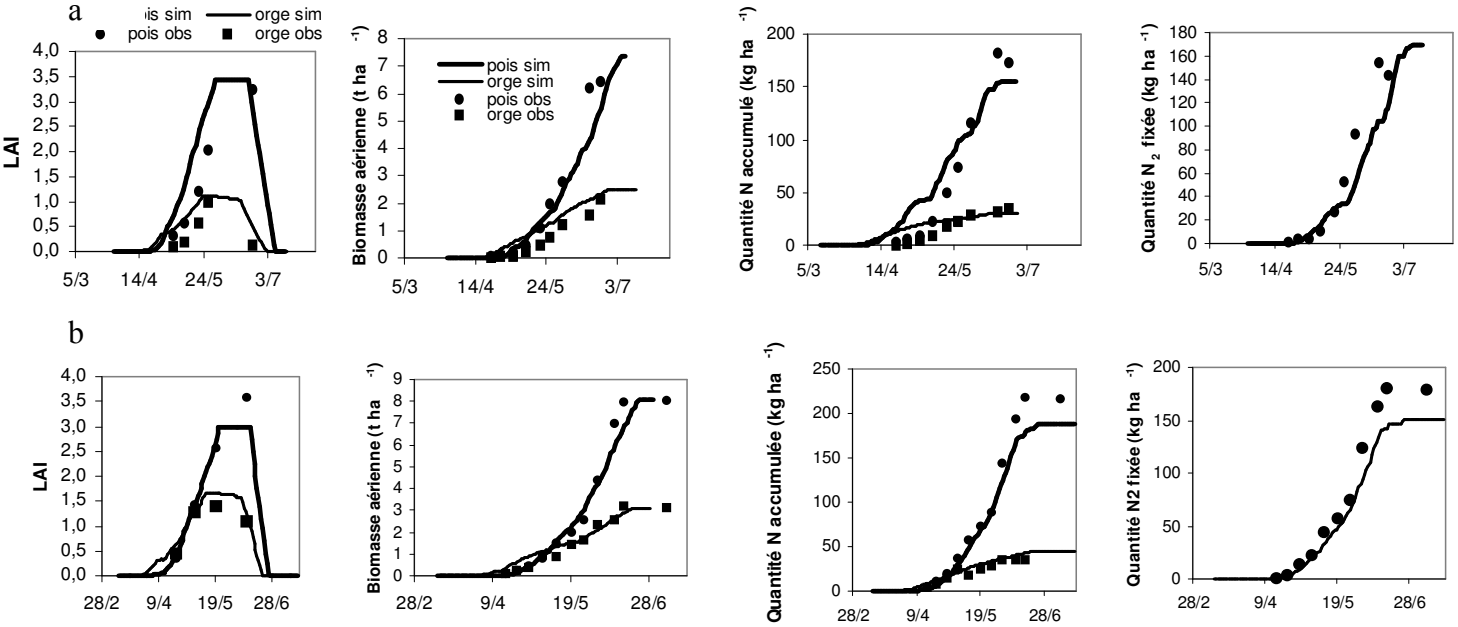


Figure 1 : Valeurs observées et simulées de l'indice foliaire, de la biomasse aérienne, de la quantité d'N accumulée et de la quantité d'azote fixée pour 2 situations a :2002, sol sableux, disponibilité en N minéral au semis de 22 kg ha^{-1} sur 0-70 cm, pois (80 pl m^{-2})-orge (40 pl m^{-2}) et b : 2003, sol argilo-sableux, disponibilité en N minéral au semis de 71 kg ha^{-1} sur 0-70 cm, pois (40 pl m^{-2}, orge 125 pl m^{-2})

Les résultats des simulations en association et en culture pure font apparaître un gain de rendement d'environ 20 % et une augmentation de l'accumulation d'azote d'environ 30 % en association en comparaison des cultures pures. Ces résultats sont cohérents avec les données

expérimentales et conformes aux résultats obtenus par d'autres auteurs pour des associations similaires (Jensen, 1996 ; Hauggaard-Nielsen, 2002).

D'autre part, le modèle simule bien l'effet majeur de la disponibilité en N du milieu sur la part de chaque espèce dans le mélange final (figure 2). Ainsi en l'absence d'apport d'N en 2003, dans une association composée de 40 pl m^{-2} de pois et 125 pl m^{-2} d'orge, le pois représente un peu plus de 70% de la biomasse totale produite alors que dans le cas d'un apport de 130 kg ha^{-1} d'azote, le pois ne représente plus que 35 % de la biomasse totale.

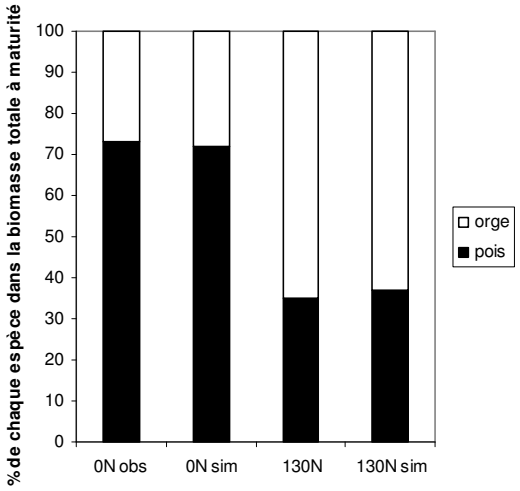


Figure 2 : Pourcentage de chaque espèce dans la biomasse totale de l'association pois-orge à maturité avec ou sans apport d'N. Valeurs observées et simulées.

D'après le modèle et en accord avec les observations, l'orge apparaît l'espèce la plus compétitive dans les associations orge-pois. Elle présente un enracinement plus rapide que le pois lui conférant un accès plus important à l'eau et à l'azote dès le début de cycle. D'autre part, elle présente une vitesse de croissance plus élevée en tout début de cycle due principalement à une levée plus rapide, d'une expansion foliaire plus forte, d'une efficience de conversion en MS supérieure à celle du pois. Ces écarts de vitesse de croissance se traduisent par des écarts de demande en N qui ajoutés aux écarts d'enracinement sont probablement à l'origine d'une forte compétitivité de l'orge par rapport au pois pour l'azote minéral.

La forte compétitivité de l'orge pour l'azote minéral entraîne une réduction plus importante du pool d'N minéral en association comparativement au pois pur. Ceci se traduit par une augmentation de la part d'azote provenant de la fixation chez le pois associé (figure 3), résultat fréquemment reporté dans des associations céréales-légumineuses (Jensen, 1996 ; Hauggaard-Nielsen, 2002 ; Corre-Hellou et Crozat, 2004).
La prise en compte, dans le module fixation, de l'effet inhibiteur des nitrates ainsi que l'introduction d'un lien entre la croissance et la fixation potentielle permettent de bien simuler ciation avec l'orge (figure 1).

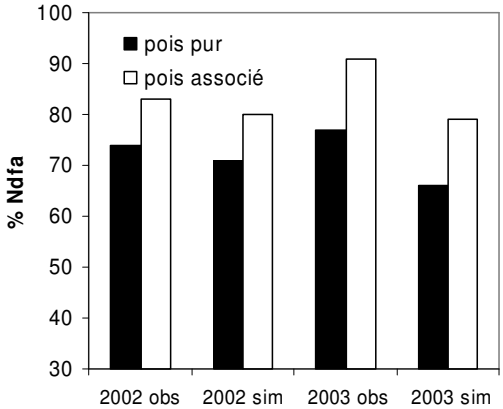


Figure 3 : Comparaison du pourcentage d'azote accumulé par le pois provenant de la fixation symbiotique (%Ndfa) en culture pure et en association. Valeurs observées et simulées pour 2002 et 2003.

Conclusion

L'adaptation de STICS pour la simulation de cultures associées pois-orge fera l'objet d'une validation dans le cadre d'un programme européen INTERCROP à partir de données expérimentales issues d'essais similaires menés dans 5 sites européens (Danemark, Allemagne, Angleterre, Italie, France).
Ce modèle pourra aussi servir à tester différentes stratégies d'associations (densités, dates de semis, effet apport N…) en étudiant leur impact sur les interactions entre espèces et sur les performances finales dans des situations pédoclimatiques variées. Quelles combinaisons de pois et d'orge entraînent un gain de rendement le plus important et une utilisation maximale des ressources ? Quel est l'impact d'un semis décalé des deux espèces ? Quels critères variétaux sont les plus déterminants dans l'expression de la compétitivité d'une espèce cultivée en association avec une autre ?
Ce modèle peut servir d'outil à mieux comprendre la complexité des interactions entre espèces en permettant de hiérarchiser les facteurs responsables de la domination de telle ou telle espèce : par exemple identifier ce qui est plus déterminant dans la compétitivité pour l'azote du sol entre l'offre (fonction du système racinaire de chaque espèce) et la demande en N de chaque espèce.

Ce travail fait partie du projet européen INTERCROP financé par l'Union Européenne dans le cadre du 5ème PCRD.

Références

Brisson N., Bussière 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 and 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. Accepted for publication.
Corre-Hellou G and Crozat Y 2004 Interspecific competition for soil N in pea-barley mixtures during the vegetative phase and consequence on N2 fixation. In 5th Conference on Grain Legumes, AEP, Dijon, France, 7-11 june, 2004.
Haugaard-Nielsen H. 2001 Competitive interactions, resource use and nitrogen dynamics in annual intercrops in low-input cropping systems. PhD. pp. 113 p. Risoe, Denmark: KVL.
Jensen E. S. 1996 Grain yield, symbiotic N_2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 182, 25-38.
Willey R. W. 1979 Intercropping - Its importance and research Needs. Part 1. Competition and Yield advantages. *Field Crops Abstr.* 32, 1-10.

Analyse des interactions besoin en évapotranspiration et rendement en blé : mise au point d'un logiciel d'aide à l'irrigation

A. Sahli[1,*], M. Jabloun[1], H. Ben Haj Salah[1], K. Latiri[2]
1. Institut National Agronomique de Tunisie, 43 Av. Charles Nicolle, 1080 Tunis, Tunisie.
2. Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie.
Correspondance à A. Sahli. E-mail: sahli_inat_tn@yahoo.fr

Introduction

En Tunisie, la culture de blé représente la spéculation agricole la plus importante compte tenu de son rôle stratégique dans l'économie et la sécurité alimentaire du pays. Conduite généralement en sec, sa production est caractérisée par une variabilité interannuelle. Elle est principalement due aux facteurs climatiques, particulièrement, la pluviométrie et l'évapotranspiration et aux pratiques agricoles, essentiellement, l'application de la fertilisation azotée. Les objectifs de cette étude sont : (1) analyser la réponse du rendement régional en blé à la variabilité interannuelle du déficit hydrique climatique ; (2) mettre au point un modèle simple de bilan hydrique qui intègre cette variabilité des facteurs climatiques et permet d'examiner l'impact du déficit hydrique au niveau du sol sur le rendement et de ressortir la nécessité d'adoption de l'irrigation d'appoint ; (3) développer un outil de conseil pour la conduite des arrosages en temps réel, qui soit simple et facile à utiliser.

Matériels et méthodes

L'étude entreprise concerne la région de Tunis. La superficie des céréales emblavées dans la région couvre en moyenne 62 mille hectares dont 68% sont occupés par du blé dur. L'objectif premier étant d'analyser, sur 6 campagnes agricoles, l'impact des facteurs climatiques sur le rendement régional en blé dur. Ainsi, des données climatiques concernant la pluviométrie (P), la température (T_{min}, T_{max}), l'humidité de l'air (HR_{min}, HR_{max}), la durée d'insolation (n) et la vitesse du vent (u_2) ont été collectées à la station de Tunis-Carthage (36°50'N,10°14'E). L'évapotranspiration de référence (ET_o) a été estimée à l'aide du logiciel MABIA-ETo (Jabloun et Sahli, 2004). L'approche théorique sur laquelle se base ce logiciel est l'équation de la FAO Penman-Monteith proposée par Allen et *al.*, (1998) et validée par Li et *al.* (2003) en condition semi-aride. Comme le montre l'éq. 1, la demande évaporative de l'atmosphère se décompose en un terme énergétique conditionné par le bilan radiatif et un terme aérodynamique conditionné par le déficit de pression de vapeur :

$$ETo = ETo_{Rn} + ETo_{DPV} = \frac{0.408\,\Delta\left(R_n - G\right) + \gamma \dfrac{900}{T_{moy} + 273} u_2 \left(e_s - e_a\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0.34 u_2\right)} \text{ [mm/jour]} \qquad (1)$$

R_n : Rayonnement net à la surface de la culture [MJ m^{-2} j^{-1}]	G : Densité de flux de chaleur dans le sol [MJ m^{-2} j^{-1}]
T_{moy}: Température moyenne mesurée à 2 m du sol [°C]	u_2 : Vitesse du vent mesurée à 2 mètres du sol [m s^{-1}]
e_a : Pression de vapeur de l'air [kPa]	e_s : Pression de vapeur saturante de l'air [kPa]
Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante [kPa °C^{-1}]	γ : Constante psychrométrique de l'air [kPa °C^{-1}]

L'exploration de l'incidence du contexte climatique sur les rendements observés a nécessité la résolution du bilan hydrique journalier au niveau du système sol-plante :

$$T_{ri} = T_{r_i - 1} - \left[\left(P_i + I_i\right) - \left(ET_{ci} - DP_i - RO_i\right)\right] \qquad (2)$$

dans lequel, les apports sont la précipitation P_i et éventuellement, l'irrigation nette I_i et les pertes sont l'évapotranspiration de la culture ET_{ci}, le ruissellement RO_i et le drainage DP_i. T_{ri}, étant la déplétion de l'eau au niveau de la zone racinaire.

ETc a été estimée au moyen de l'évapotranspiration de référence (ET_o) et du coefficient culturale (K_c). Ce dernier est calculé selon l'équation suivante :

$$K_c = K_e + K_{cb} \tag{3}$$

Ainsi, le formalisme utilisé pour l'estimation de K_c est emprunté à Allen et *al.* (1998) qui dissocient l'évaporation de l'eau par la couche superficielle du sol (K_e) et la transpiration de la culture (K_{cb}).

Le coefficient d'évaporation (K_e) dépend de la disponibilité en eau (i.e. déplétion D_e) et de la fraction humidifiée (f_w), au niveau de la couche superficielle du sol et du degré de couverture du sol par la culture (f_c). Ainsi, la détermination de ce paramètre et par suite de l'évaporation journalière (E_i) a nécessité la réalisation d'un calcul séparé du bilan hydrique au niveau de la fraction humidifiée et exposée (f_{ew}) de la surface du sol :

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + DP_{e,i} \tag{4}$$

Le coefficient cultural de base K_{cb} se définit comme le rapport ET_c/ET_o quand la surface du sol est sèche mais la transpiration est à son niveau potentiel du fait que l'eau disponible dans le sol n'est pas limitante. Ainsi, pour le calcul du bilan hydrique il est indispensable de disposer d'informations sur la variation au cours de chaque phase de développement de la culture, du coefficient cultural de base K_{cb}, de la profondeur d'enracinement et du facteur de tarissement (p) qui exprime la fraction à laquelle l'eau totale disponible dans le sol (RU) peut être prélevée par la culture sans qu'elle souffre de déficit hydrique (p = RFU/RU). Ces données tirées de la documentation de la FAO (Doorenbos et Pruit, 1986 ; Allen et *al.*, 1998) et des résultats de recherches spécifiques à la variété "Karim"de blé dur cultivée en Tunisie (Latiri, 1994 ; Hafani, 1997), sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Données concernant la culture du blé dur

Période	Phase de développement (somme de température,°C)	Phase de croissance	K_{cb} coef. cult. base	Z_r prof. racines (m)	p facteur tarissement
Nov. – Dec.	Semis-Début Tallage (500)	Initiale	0.15	0.3	0.60
Dec. – Jan.	Tallage (400)	Développement	0.15 – 1.10	0.3 – 1.00	0.60
Jan. – Mar.	Montaison (700)	Mi-saison	1.10	1.00	0.60
Mar. – Mai	Floraison-Maturité (900)	Arrière-saison	1.10-0.25	1.00	0.60

Dans cette étude, les caractéristiques d'un horizon argilo-limoneux, typique des sols d'origine fluviale de la région de Tunis, ont été utilisées. Les teneurs en eau volumique à la capacité au champ et au point de flétrissement sont respectivement, 39.3% et 25.5%. Ainsi, la réserve utile (RU) est de 138 mm d'eau par mètre de profondeur du sol.

Résultats

La sensibilité du rendement du blé dur aux conditions climatiques régnantes durant les six campagnes d'étude est montrée dans la figure 1. Les tracés obtenus traduisent bien la relation forte entre les rendements obtenus et la pluviométrie (figure 1a) et l'évapotranspiration de référence (figure 1b). Ils expriment aussi les effets antagonistes de ces deux paramètres. La figure 1b révèle

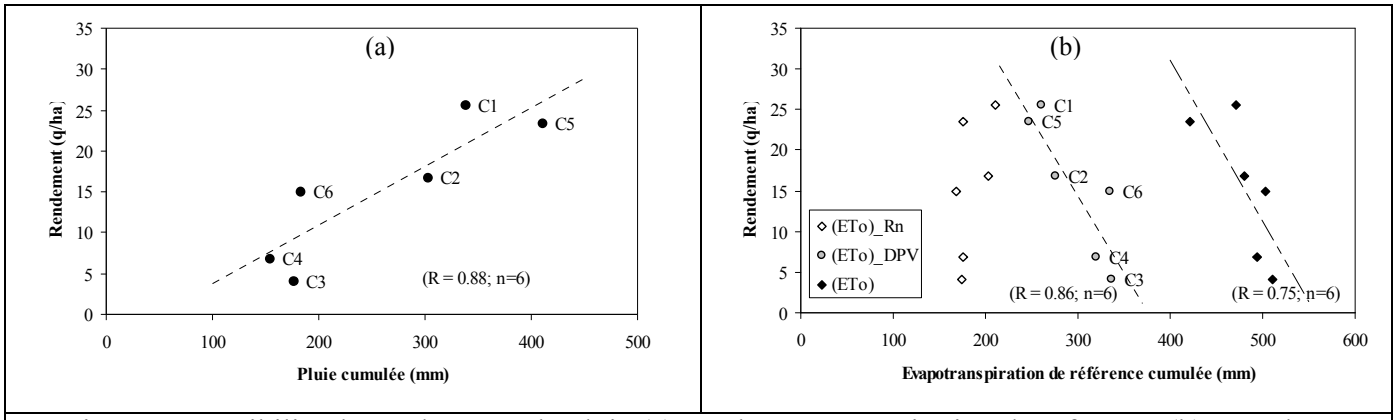


Figure 1. Sensibilité du rendement à la pluie (a) et à l'évapotranspiration de référence (b) cumulées

aussi que l'incidence négative de la demande évaporative de l'atmosphère sur le rendement est plutôt liée au terme aérodynamique, conditionné par le déficit de pression de vapeur (ETo_{DPV}), qu'au terme énergétique, conditionné par le bilan radiatif (ETo_{Rn}).

Les simulations du déficit hydrique au niveau de la zone racinaire (Ta) pour les conditions climatiques des six campagnes agricoles étudiées indiquent que pour les campagnes C_3 et C_4 où des faibles rendements ont été enregistrés, le régime capricieux des pluies a engendré l'installation d'un déficit hydrique sévère dès le début du cycle (figure 2a) alors que pour les campagnes C_1 et C_5 où des rendements proportionnellement élevés ont été obtenus, la pluie a été bien répartie et relativement suffisante pour garantir un déficit hydrique raisonnable durant une bonne partie du cycle végétatif du blé (figure 2b).

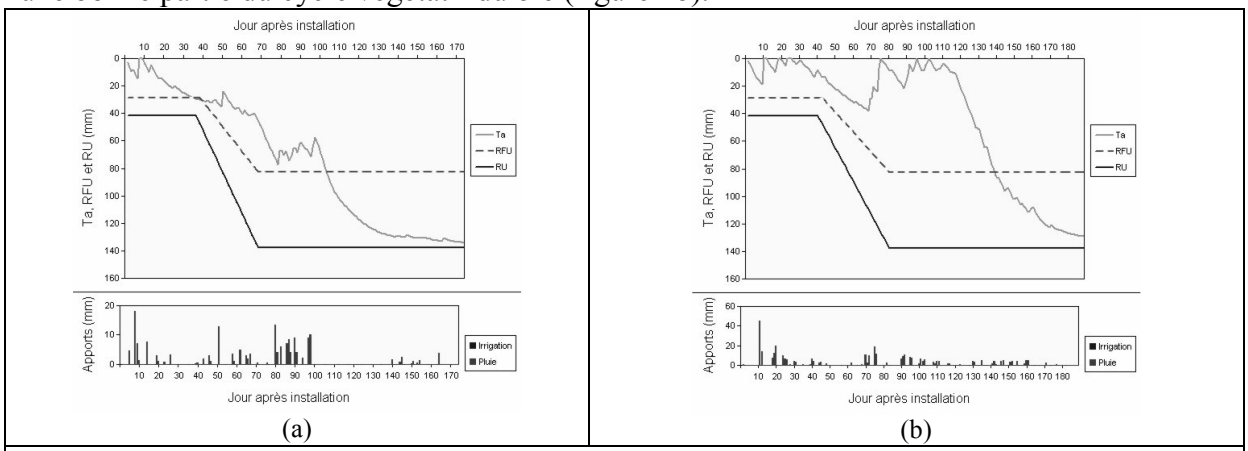


Figure 2. Déficit hydrique simulé dans la zone racinaire pour (a) campagne C_3 et (b) campagne C_1

Cette incidence de la contrainte hydrique au niveau du sol sur le rendement a été confirmée par la bonne corrélation obtenue entre les rendements des six campagnes et les déficits hydriques moyens sur tout le cycle au niveau de la zone racinaire (figure 3). Ces derniers ont été calculés à partir des résultats de simulation du déficit hydrique journalier, obtenus à l'aide du modèle élaboré et suite à l'application des conditions climatiques des différentes

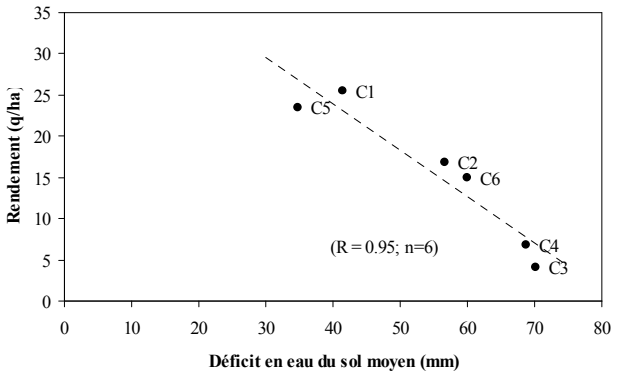


Figure 3. Relation entre le déficit hydrique moyen du sol et le rendement en blé

campagnes (exemple figure 2).

Aussi, comme le montre le tableau 2, le stress hydrique durant les phases tallage-montaison et montaison-floraison, conditionne fortement le rendement final. Ceci confirme l'importance du régime d'alimentation hydrique aussi bien en dose qu'en fréquence dans l'élaboration du rendement final. En effet, le déficit hydrique durant la première période, en limitant l'activité métabolique de la plante, altère la puissance de tallage en ralentis-

Tableau 2. Coefficient de corrélation entre le rendement et le déficit hydrique moyen durant les différentes phases de développement

Phase de développement	Coef. de corrélation (R)
Semis- début Tallage	0.20
Tallage	0.89
Montaison	0.84
Floraison-Maturite	0.75
Semis - Maturité	0.95

sant l'émission des talles ainsi que la fertilité des épis. Aussi, le déficit de montaison a des conséquences sur la masse des grains puisqu'il diminue la croissance des organes réserve que sont les tiges et par conséquent a un effet sur l'élaboration du nombre d'épis fertile par m^2, du nombre de grains par épi et de la masse moyenne des grains (Latiri, 1994 ; Gate, 1995). Ainsi, l'irrigation d'appoint, surtout pendant les phases de sensibilité de la culture, peut-être un moyen de régularisation du rendement. Cependant, les questions auxquelles il faut répondre sont : quand irriguer et quelle quantité d'eau appliquer. Or, pour réussir un pilotage des irrigations d'appoint du blé, l'agriculteur doit disposer d'un outil d'aide à la décision basé sur les relations entre la capacité de stockage de l'eau dans le sol et l'utilisation de l'eau par la culture qui est, elle-même, en rapport étroit avec les conditions climatiques réelles. En effet, comme le montre la figure 4, quatre irrigations auraient été nécessaires durant la campagne C_3 (figure 4a) alors qu'une seule aurait suffit lors de la campagne C_1 (figure 4b).

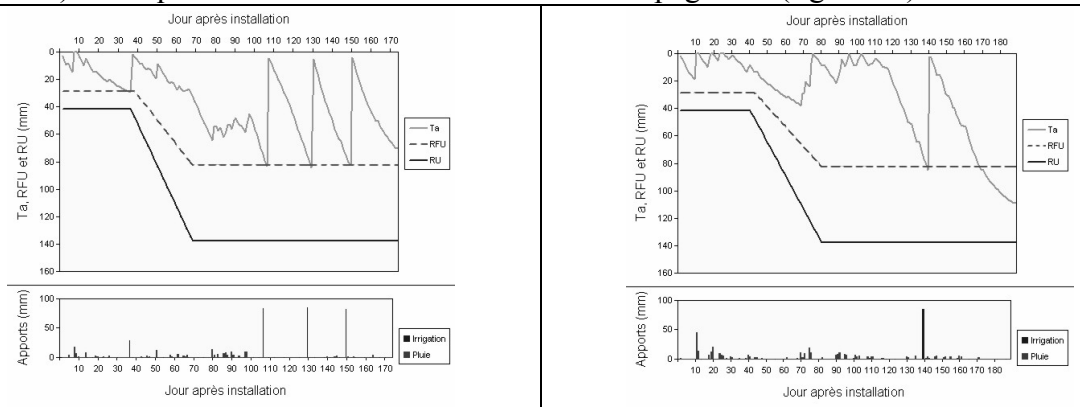


Figure 4. Simulation du déficit hydrique dans la zone racinaire en cas d'irrigation d'appoint pour
(a) campagne C_3 et (b) campagne C_1

C'est pourquoi, nous avons opté pour un outil qui offre à l'irriguant la possibilité d'un suivi quotidien de l'évolution du bilan d'eau dans le sol en fonction des données climatiques réelles qu'il introduit. Un programme d'irrigation (doses et fréquences) est proposé dès que le déficit en eau du sol atteint sa valeur seuil (RFU). Afin de combler le manque éventuel d'informations de l'utilisateur, ce logiciel intègre en outre une base de données évolutive concernant les caractéristiques, de la culture (tableau 1), du type de sol (θ_{SAT}, θ_{CC}, θ_{PFP}, RU) et du système d'irrigation. (f_w). Par ailleurs, un outil graphique a été intégré au programme de calcul afin de faciliter la lecture des résultats (exemple figure 4).

Conclusion

Sur la base d'une analyse de l'impact de la pluviométrie et l'évapotranspiration de référence sur le rendement du blé dans la région de Tunis, un modèle simple d'estimation du bilan hydrique a été développé. Les résultats de simulation ont permis de dégager l'incidence négative de la contrainte hydrique au niveau du sol sur les rendements obtenus. Aussi, l'impact de la période d'action et de l'intensité du stress sur la chute du rendement a pu être élucidé. Enfin, un outil d'aide à la gestion des irrigations d'appoint du blé a pu être mis au point permettant l'établissement de calendriers modulables en fonction des conditions climatiques réelles. Après validation de son utilisation pour des conditions pédoclimatiques différentes de celles de la région d'étude, l'intégration d'un module d'estimation du bilan d'azote est envisageable.

Références

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome : FAO. pp 300.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1986). Les besoins en eau des cultures. Bulletion *FAO Irrigation et Drainage 24*. Rome : FAO. pp. 235.

Hafani, M. (1997). Modélisation agrométéorologique de la croissance du blé. *Mastère, INAT*. pp. 92.

Gate, P. (1995). Ecophysiologie du blé. ITCF. pp 429.

Latiri, K. (1994) Analyse of the effects of water and nitrogen supply on the yield and growth of durum wheat under semi-arid conditions in Tunisia. *PhD thesis, Reading University*, UK. pp. 235.

Li, Y.L. Cui, J.Y., Zhang, T.H., Zhao, H.L. (2003). Mesurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north China. *Agronomy Water Management*, 61, 1-12.

Jabloun, M., Sahli, A. (2004). MABIA-ETo : un logiciel d'estimation de l'évapotranspiration de référence. *11ème Journées Scientifiques sur les Résultats de la Recherche Agricole*. Tunis : IRESA (en presse).

Effet des cultures intermediaires sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes
Etude de cas par simulations avec le modèle STICS

S. Minette[1], E. Justes[2]
1. Agrotransfert Poitou-Charentes, INRA les Verrines, 86600 Lusignan
2. INRA Auzeville, UMR ARCHE, 31326 Castanet-Tolosan Cedex

Introduction

Depuis quelques années, de nombreux travaux ont montré que l'interculture est la « période critique » en terme de pollution azotée des eaux (par exemple, Mary et al., 1997). La gestion de cette période répond souvent à des objectifs de restructuration du sol, de gestion des ravageurs et des adventices. Mais depuis quelques années, se sont greffées des préoccupations environnementales (limitation des pertes d'azote, de l'érosion) afin d'aboutir à des modes de production plus durables.
Cependant, les risques de pollution azotée ne sont pas identiques pour tous les systèmes de culture et dépendent des successions pratiquées et du type de sol cultivé. Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) ont également démontré leur efficacité pour réduire les fuites de nitrate en interculture (par exemple, Machet et al., 1997 ; Aubrion et Briffaux, 1998 ; Dorsainvil, 2002).
Une première évaluation sur quelques successions jugées à risques « Colza - blé », « Blé - tournesol », « Blé - maïs » a été effectuée dans la région Poitou-Charentes par simulation avec le modèle STICS adapté pour les CIPAN (Dorsainvil, 2002).
Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme Agrotransfert[8] « Gestion de l'interculture et qualité de l'eau » et s'inscrit dans le partenariat avec l'INRA sur l'utilisation de modèles de simulation comme « outils » d'acquisition de références. Préalablement, le modèle a été évalué avec satisfaction dans un réseau d'essais menés en Poitou-Charentes entre 2001 et 2003.

Matériels et Méthodes

[8] *Agrotransfert Agronomie est un programme porté par la Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes en partenariat avec l'INRA et les acteurs régionaux intervenant dans la recherche et le développement.*

La diversité pédo-climatique de la région Poitou-Charentes a été respectivement abordée par l'étude de quatorze sols représentatifs de l'hétérogénéité régionale et de trois stations climatiques sur 35 années.
Ces trois stations définissent un climat plutôt humide (Saintes), moyen (Ruffec) ou sec (Loudun) selon le cumul des précipitations pendant la période d'interculture.

Stations climatiques	Précipitations du 25 juillet au 15 avril (« interculture »)
Saintes	695 mm
Ruffec	620 mm
Loudun	480 mm

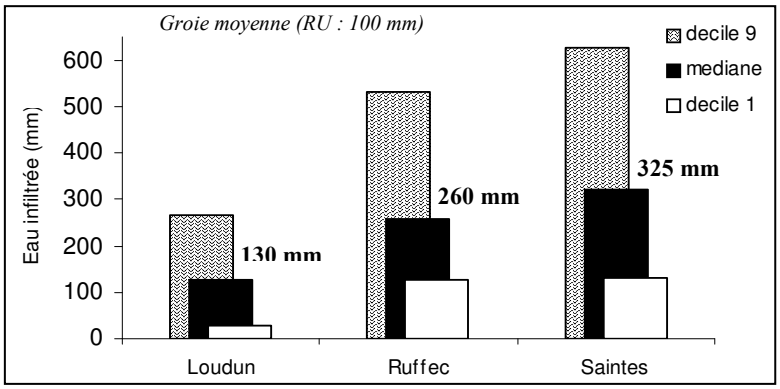
A travers l'étude de cas par simulation, nous avons évalué l'influence de cultures intermédiaires pièges à nitrates sur les bilans d'eau et d'azote pendant l'interculture (drainage, pertes d'azote) et sur la culture suivante (disponibilité en eau et azote). Les simulations nous ont aussi permis de définir des dates de levée et destruction optimales satisfaisant conjointement les impératifs agronomiques et les exigences environnementales.
Par ailleurs, l'étude fréquentielle de différents contextes pédo-climatiques a mis en évidence la variabilité des réponses selon la station climatique et le sol étudié, d'où une adaptation parfois nécessaire des préconisations agronomiques. Les critères statistiques utilisés sont la médiane, le premier et neuvième déciles.

Résultats

- ***Approche de la variabilité inter-annuelle et spatiale de l'effet des CIPAN***

L'étude fréquentielle des différentes stations climatiques a mis en évidence des différences importantes de développement annuel des cultures intermédiaires (moutarde, RGI) pour une station donnée. De même, les potentiels médians de production diffèrent entre stations climatiques. Il sont par exemple de l'ordre de 1.5 t/ha à Loudun et de 2.2 t/ha à Saintes pour un type de sol identique.

Cette variabilité inter-annuelle et spatiale s'exprime aussi fortement sur la quantité d'eau infiltrée sous la zone racinaire, et donc sur la concentration en nitrates de l'eau percolée qui contribue à la recharge des aquifères. Pour la station de Loudun avec une valeur médiane d'infiltration efficace de **130 mm** (groie moyenne[9]), la perte de **15 kg/ha d'azote** entraîne une concentration moyenne de **50 mg/l** de nitrates de l'eau percolée. A Saintes, pour obtenir la même concentration, les pertes pourront être de **37 kg/ha**. Bien sûr, l'objectif à Saintes et Loudun est de limiter au maximum les pertes d'azote, cependant, en terme de **concentration (mg/l),** les deux stations ne sont pas sur le même pied d'égalité.



Graphique 1. Quantités d'eau infiltrée du 25/07 au 15/04 (mm) pour un même sol sous trois stations climatiques (sol de groie moyenne[2], contexte Poitou-Charentes, succession « blé tendre - culture de printemps »)

- ***Approche de la variabilité pédologique***

Les résultats des simulations conduisent à une hiérarchisation des différents sols en fonction du risque « concentration en nitrates de l'eau infiltrée » qui dépend principalement de la minéralisation du sol pendant l'interculture et de la sensibilité à l'infiltration verticale de l'eau (tableau 1).

[9] *Groie moyenne : « nom vernaculaire », correspond à un sol argileux – calcaire – moyennement profond - sur calcaire jurassique*

Hiérarchisation, pour deux contextes climatiques, de 4 sols en fonction de la concentration en nitrates de l'eau infiltrée : *- 3 sols « argile calcaire caillouteuse sur calcaire dur » (groies) à 3 % de MO, de réserve utile 70, 100, 135 mm (gs70, gm100, gp135)* *- 1 sol limoneux à 1.7 % de MO, de réserve utile 135 mm (lim135)*		
Station	***Hiérarchisation des 4 sols***	***Commentaires***
Loudun	gs70 > gm100 > lim135 > gp135	**1.** Les faibles précipitations pendant l'interculture entraînent une lixiviation partielle de l'azote du sol. Plus la réserve utile (RU) du sol est faible, plus la quantité d'azote lixivié est importante. La classification est effectuée en fonction de la RU des sols. **2.** Pour les sols possédant la même réserve utile, la hiérarchisation s'explique par les différences de minéralisation du sol pendant l'interculture. Le sol « lim135 » minéralise plus d'azote que « gp135 », les pertes sont donc plus importantes
Saintes	lim135 > gp135 = gm100 > gs70	**1.** Les fortes précipitations à Saintes entraînent la lixiviation de la quasi-totalité de l'azote du sol, quelque soit le sol. Les sols minéralisant beaucoup sont donc plus à risque. **2.** Tout l'azote du sol de la gs70 est lixivié et les fortes précipitations entraînent un phénomène de dilution qui conduit à des concentrations inférieures.

Tableau 1. Exemple de hiérarchisation de différents sols en fonction de la concentration en nitrates de l'eau percolée (mg/l)

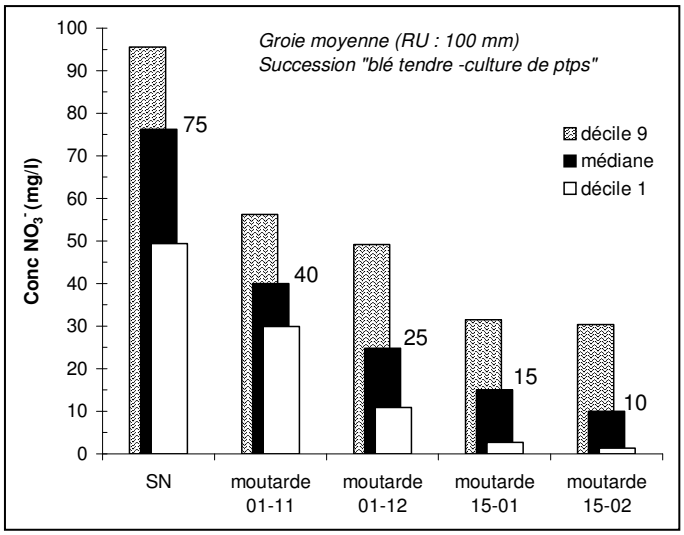
- ***Maîtrise des pertes de nitrates***

L'efficacité des cultures intermédiaires (moutarde, RGI) est démontrée , quelque soit le contexte pédo-climatique de la région et la succession de cultures (« Blé-Tournesol » et « Blé-Maïs »).

En terme **d'itinéraire technique**, l'efficacité maximale de la moutarde est souvent obtenue pour des dates de levée au **1er septembre**. Cependant, les levées plus tardives (1er octobre) permettent, dans la majorité des cas, une réduction de pertes en nitrates de l'ordre de 50 %. L'implantation d'un couvert après des cultures à récolte tardive comme le tournesol et le maïs ensilage est donc utile dans le contexte régional de Poitou-Charentes.

La diminution maximale des pertes d'azote est atteinte avec des couverts détruits tardivement (février). Cependant, **au-delà du 1er décembre**, la réduction des pertes devient faible à très faible en fonction du climat. Pour des raisons agronomiques (facilité de destruction, montée à « graines », disponibilité en azote pour le suivant), la destruction pourra donc être réalisée à partir de début décembre sans réduire significativement l'efficacité des cultures intermédiaires sur le piégeage des nitrates.

Graphique 2. Impact de la date de destruction de la moutarde sur la concentration en nitrates (mg/l) de l'eau infiltrée (station de Ruffec, groie moyenne, levée de la moutarde fixée au 1/09, contexte Poitou-Charentes)



- ***Impacts sur la culture suivante***

La gestion de l'interculture peut influencer la disponibilité en eau et en azote du sol pour la culture suivante. L'analyse de l'impact d'une moutarde et d'un ray-grass ne montre aucun effet négatif sur la **disponibilité en eau** pour le suivant (cas de cultures suivantes semées en avril-mai) si la destruction est réalisée jusqu'au 15 février. Dans le cas d'un ray-grass en dérobée, son maintien tardif (avril) engendre une diminution du stock d'eau disponible les années sèches. En fonction du type de sol, la culture suivante sera plus ou moins pénalisée, à savoir environ 1 année sur 2 pour un sol de type « groie moyenne » (argile calcaire caillouteuse sur calcaire dur).

Pour la **disponibilité en azote**, l'utilisation de moutarde, pendant l'interculture, n'occasionne pas d'effet négatif sur le suivant. Cependant, pour bénéficier d'une restitution maximale à la culture suivante, la destruction du couvert devra s'effectuer au plus tard mi-décembre en climat sec ou médian et pourra être réalisée plus tardivement en climat humide (jusqu'au 15 janvier). Si la destruction est plus tardive la restitution en azote sera réduite et décalée dans le temps.
La minéralisation d'une partie des résidus de culture intermédiaire enfouis est rapide (3 à 4 mois) même si la destruction des CIPAN est réalisée en hiver. Cette libération d'azote permet de revenir à des quantités dans le sol équivalentes au sol nu et dans la majorité des situations, ou procure un gain médian en azote, de l'ordre de 10 à 20 kg par hectare selon la station climatique et le type de sol. Cette restitution d'azote représente 30 à 40 % (maximum) de la quantité totale d'azote piégé par la moutarde.

Ruffec	dates de destruction			
Dates de levée	1-nov	1-déc	15-janv	15-févr
15-août	35	40	40	40
01-sept	35	40	40	35
15-sept	35	40	40	40
01-oct	35	35	35	35

(valeurs médianes) **sol nu : 30 kg/ha**

Tableau. 2. Impact des dates de levée et destruction de la moutarde sur la quantité d'azote présente dans le sol au 15 avril pour la station climatique de Ruffec et un sol de « groie moyenne ». (succession « blé tendre - maïs, simulation du 25/07 au 15/04, contexte Poitou-Charentes)

Conclusion

Ce travail constitue une première base de références pour les conseillers qui pourra être complétée par une confrontation avec des observations *in situ* et si besoin de nouvelles simulations.

La démarche consiste à utiliser les modèles comme outil d'expérimentation virtuelle pour produire des références régionales par système de culture. Dans un premier temps, ces références peuvent être mobilisées pour le diagnostic et l'évaluation et ainsi définir des priorités d'actions.
Dans un deuxième temps, elles pourront être intégrées à un outil d'aide à la décision permettant de faire des choix de gestion de l'azote dans la rotation (Minette, 2003).

Mots clés : simulation, bilans eau et azote, CIPAN, analyse fréquentielle, pédo-climat

Références

Aubrion G. et Briffaux G., 1998. -Les meilleures pièges à nitrates. *Perspectives Agricoles*, 239, pp. 71-75.

Boutant S., 2003. -Effets des couverts en interculture sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes : Etude de cas par simulation STICS. Mémoire de fin d'études, ENITA Clermont Ferrand, 45p.

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 culture. Thèse de doctorat, INA P-G, 124 p.

Machet J.M., LaurentT F., Chapot J.Y., et Dulout A., 1997. -Maîtrise de l'azote dans les intercultures et jachères. In : *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Les colloques de l'INRA, INRA-Editions, Paris

Mary B., Beaudoin N., et Benoit M., 1997. -Prévention de la pollution nitrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau. . In : *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Les colloques de l'INRA, INRA-Editions, Paris

Minette S., Aveline A., Bouthier A., Guichard L., Laurent M. et Reau R., 2003. -Des référentiels régionaux pour gérer l'azote dans la rotation. *Oléoscope*, 76, pp.19-22.

Une chaîne de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: application à l'évolution depuis 1970 des pratiques agricoles dans le bassin de la Seine

An Integrated Modelling Tool for Nitrates Transport in a Hydrological System: Application to the River Seine Basin

Marc Benoît, Catherine Mignolet, Céline Schott
INRA, SAD, Mirecourt
Eric Gomez, Emmanuel Ledoux, Pascal Viennot
Ecole des Mines de Paris, CIG, UMR Sisyphe
Bruno Mary,
INRA, Unité d'Agronomie, Laon
Nadine Brisson
INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, Avignon
Gilles Billen, Agnès Ducharne
UMR Sisyphe 7619, Université Pierre et Marie Curie
Daniel Brunstein
CNRS, UMR – 1, Meudon

Résumé :

L'accroissement régulier de la contamination nitrique des eaux souterraines et superficielles dans le bassin de la Seine est un sujet de préoccupation. Un axe de recherche majeur dans le cadre du GDR PIREN-Seine consiste en le développement d'une chaîne de modélisation des transferts d'azote depuis les sols jusqu'aux eaux de surface, à l'échelle du bassin de la Seine, en tenant compte de l'inertie conférée par les temps de résidence parfois très longs dans les sols et les aquifères.

En amont de cette chaîne de modélisation, un travail original de capture puis de traitement des données spatialisées relatives aux caractéristiques pédologiques, à l'occupation des sols et aux pratiques agricoles est réalisé à l'INRA, pour identifier les unités spatiales à prendre en compte. Deux entités agronomiques ont été informées et ont permis de créer une base de données régionales construite sur une segmentation du bassin en 147 Petites Régions Agricoles:

- les successions culturales par traitement des données TerrUti de 1982 à 2002,
- l'évolution des pratiques agricoles par couvert végétal, en mobilisant les connaissances d'acteurs agricoles experts dans ce domaine (conseillers de chambre d'agriculture, conseillers de coopératives,…).

Ce travail fournit les données d'entrée pour le modèle agronomique générique et modulaire STICS (INRA), qui simule le fonctionnement du système sol-eau-plante-atmosphère au pas de temps journalier, en prenant en compte la croissance et le développement des cultures ainsi que les bilans en eau et en azote. Une procédure de régionalisation de STICS est mise en œuvre pour simuler les flux de nitrates à la base de la zone sous-racinaire sur l'ensemble du bassin de la Seine.

Ces flux sont ensuite intégrés dans un modèle hydrologique couplé surface-souterrain MODCOU (ENSMP) qui simule au pas de temps journalier les bilans hydriques spatialisés, les débits dans le réseau hydrographique et les variations piézométriques dans le système aquifère en fonction des forçages atmosphériques (pluie, ETP). Ce modèle simule ensuite la circulation des nitrates et l'évolution résultante de la contamination nitrique des eaux

superficielles et souterraines grâce à un modèle compatible de transport en solution, NEWSAM (ENSMP). Les flux d'azote parvenant aux rivières sont utilisables par le modèle SENEQUE (UPMC) qui simule des variations saisonnières de la qualité de l'eau et du fonctionnement écologique du réseau hydrographique.

A terme, ces travaux déboucheront sur la prévision de l'évolution de la contamination nitrique en fonction de scénarios de modifications des pratiques agricoles ou du contexte.

Summary :

The regular increase of the nitric contamination of groundwater and surface water on the river Seine basin becomes preoccupying. A major research topic of the PIREN-Seine consists in developing a software for the modelling at the basin scale, of nitrogen transport from the soil to surface water, accounting with the retardation due to possible very long residence time in soil and aquifer system.

Prior to the software development, an original work of data collection and treatment in space and time has been performed by INRA concerning pedological characteristics, land use and agricultural practices, in order to determine the spatial units to be included into the model. These date are input data for the STICS software (INRA) which simulates the functioning of the soil-water-vegetation system with a daily time-step, taking into account the growth of the crops, and the nitrogen and water balances. A procedure fort the spatialisation of STICS at the basin scale has been derived and computes the water and nitrate fluxes at the bottom of the root zone.

These fluxes are integrated into a surface and groundwater coupled model MODCOU (ENSMP) which calculates each day the water balance in the hydrological system, the flow in the rivers and the piezometric variations in the aquifers, starting from climatic data (rain, PET). This model then computes the transport of nitrates and the evolution of nitric contamination in groundwater and to the rivers thanks to a compatible software NEWSAM (ENSMP). Nitrogen fluxes reaching the rivers are available for the SENEQUE software which simulates the water quality and the ecological functioning in the hydrographical network.

This research will be used for prediction of the evolution of nitric contamination as a consequence of scenarios of modification of agricultural practices or climatic changes.

Intercropping of cereals and grain legumes for increased production, weed control, inproved product quality and prevention of N-losses in Europeen organic farming systems-INTERCROP.

Natalia Bellostas.

Biosystems Department, Risø National Laboratory, DK-4000 Roskilde, Denmark

Text:

Introduction:
The production of cereals and protein crops (pea, bean etc.) needs to be increased in organic farming in order to fulfil the requirements for organic feed and food in Europe from 2005. Within this context, INTERCROP started its activities in January 2003 with the main aim of determining the potential for intercropping in European organic farming systems. INTERCROP is a cost-shared project co-funded by the European Community that brings together scientists from seven institutions in Denmark, France, Germany, Italy and UK. This multidisciplinary European consortium conducts research on intercropping, facilitating the exchange and synthesis of existing knowledge in order to make recommendations for using intercropping as an environment-friendly plant production method for organic farming under different regional conditions.

Background:

Intercropping is defined as the growth of two or more crops simultaneously in the same field during a growing season and is the practical application of ecological principles such as diversity, crop interaction and other natural regulation mechanisms (Vandermeer, 1989). This technique has been found to have many advantages, mainly related to the complementary use of environmental resources by the component crops (Willey, 1979). Nitrogen fixing legumes can be included to a greater extent in arable cropping systems via intercrops. Legumes contribute to maintaining the soil fertility via nitrogen fixation, which is increased in intercrops due to the more competitive character of the cereal for soil inorganic N. Intercropping of grain legumes and cereals therefore offers an opportunity to increase the input of fixed nitrogen into agroecosystems without compromising cereal N use, yield level and stability.

Main project aims:

The main aim of INTERCROP is to increase the knowledge and awareness of the multifunctional role of intercropping in organic farming systems under different agro-ecological conditions in Europe. The participants will determine the intercrop yield advantage and stability, the multiple nutrient use and the effects of intercropping on the quality of products for food and feed. They will also monitor effects on weeds and diseases and will test new intercropping designs. A simulation model is also being developed to model grain legume-cereal intercrops and on-farm demonstrations are planned for the last year of INTERCROP. The project is expected to contribute to an increased use of intercropping as well as to raise concern about its associated beneficial effects, such as environmentally friendly production, ecological management of pest and weeds and healthy products.

Project workpackages:
INTERCROP consists of six inter-related workpackages made up of specific tasks which involve several partners. The project's core experiment is a field trial in which pea and barley are intercropped with spring sowing and compared with pea and barley in pure stands. To compare the performance of intercropping in organic farming situations across Europe, all INTERCROP partners have established this experiment at organic sites using the same cultivars.

1. **Survey and demonstration on-farm.** Almost 100 organic farmers across Europe have been interviewed on matters related to their use of intercropping. On-farm demonstrations will be carried out in the last year of the project.
2. **Agronomic performance and yield stability.** The agronomic performance of cereal–grain legume intercrops in terms of yield advantage and yield stability is determined in comparison to sole crops. New intercropping designs are being evaluated.
3. **Nutrient acquisition, nitrogen (N) loss and N in the following crop.** Total N acquisition and soil N are determined in order to estimate N balances, effects of intercropping on post-harvest N dynamics in the soil and the potential risks of N leaching. The N2 fixed from the atmosphere and taken up from the soil are also estimated using 15N isotope techniques. The acquisition of other nutrients (phosphorous, potassium and sulphur is also investigated.
4. **Intercropping for weed, pest and disease management.** Pests, diseases and weed infestation are monitored at the key physiological stages of the crops. A glasshouse study on root elongation has been conducted in order to evaluate root competition for nutrients.
5. **Quality parameters in intercropped components and following crops.** The effects of intercropping on the protein quality of wheat for breadmaking as well as on the feeding value of barley, wheat, pea and faba beans for livestock are being studied.
6. **Modelling.** An existing simulation model (STICS) has been adapted for its use in pea–barley intercropping with special emphasis on N uptake by the crops. The parameterisation of the model is based on a data set obtained from a pea–barley intercrop. The model is validated with a set of data collected annually by all partners.

Dissemination:
During the first two years of the project, partners have actively contributed to disseminate information about the activities being conducted in INTERCROP. Open field days to visit the different experiments have been organised at the different sites, partners have given talks at popular and scientific levels, and scientific papers, based either fully or partially on the results, have been produced. In November 2003 INTERCROP opened its own website (www.intercrop.dk), which contains information about the project as well as on other topics relating to intercropping and organic farming.

References:
Vandermeer J. 1989. The ecology of intercropping. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 237.
Willey R W. 1979. Intercropping-Its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. *Field crop abstracts*. 32: 1-10.

6. STICS, outil d'ingénierie agronomique

Animateur table ronde : F. Flenet

Expériences variées (instituts techniques, agrotransferts, INRA,…)

Utilisation des simulations de STICS comme base pour construire des itinéraires techniques en lin graine de printemps.

Francis Flénet

Section Agro-Transfert d'Alternatech – Domaine de Brunehaut – 80200 Estrées-Mons

Introduction

En Picardie, la recherche de nouvelles cultures est une priorité pour diversifier les assolements céréaliers. Le lin graine est une opportunité. Il y a une demande pour ce produit et c'est un bon précédent pour les céréales. La Picardie est bien placée pour développer le lin graine, car tous les maillons de la filière sont présents dans la région et cette espèce est bien adaptée au climat océanique. Jusqu'à présent, le développement de cette production a été freiné par l'instabilité des rendements.

L'amélioration des itinéraires techniques est un passage obligé pour mieux maîtriser la variabilité des rendements. La densité de peuplement est un point clef. Un minimum est nécessaire pour assurer la production, mais l'excès est préjudiciable car il augmente les risques de verse et de maladies. Il faut donc identifier la densité optimale, et la protection de la culture adaptée à ce peuplement.

L'objectif du travail est de préciser l'effet de la densité de plantes sur la production, pour servir de base à la construction de nouveaux itinéraires techniques. La démarche retenue consiste à adapter le modèle STICS (Brisson et al. 1998) au lin graine à partir de résultats expérimentaux. Les simulations sont utilisées pour étendre les conclusions expérimentales à d'autres années et d'autres lieux. L'adaptation de STICS au lin graine est décrite par Flénet et al. (2004). Ce document présente l'utilisation des simulations pour généraliser les conclusions.

Matériel et méthodes

Des expérimentations sont conduites en 1999 et 2002 à Estrées-Mons, dans la Somme, en limon profond. Dans ces conditions de sol et de climat, les risques de déficit hydrique sont très faibles. Les résultats présentés sont obtenus sur la variété de lin graine de printemps BAÏKAL. Les traitements étudiés sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Traitements expérimentaux

Année	Date semis	Irrigation (Oui/Non)	Densité semis
1999	15 mars	Oui	300, 700 et 1100 graines / m²
		Non	
	29 mars	Oui	
		Non	
	19 avril	Oui	
		Non	
2002	5 mars	Oui	100, 200, 400, 600 et 800 graines / m²
		Non	

Les résultats expérimentaux de 1999 et 2002 permettent d'étudier l'effet de la densité de peuplement sur la production dans un nombre limité de situations. Ces mêmes résultats ont été utilisés pour l'adaptation de STICS au lin graine (Flénet et al., 2004) : ceux de 1999 pour la calibration et ceux de 2002 pour l'évaluation. Des simulations sont réalisées en limon profond avec le climat d'Estrées-Mons de 1975 à 2003. La gamme des densités étudiées est 100 à 600 plantes / m², avec un pas de 25 plantes / m².

Résultats

L'effet du nombre de plantes sur le rendement est très variable d'une expérimentation à l'autre (Figure 1). Ceci s'explique par la présence de verse et/ou de maladies qui interagissent avec la densité : ces problèmes s'accentuent à forte densité de peuplement. En conséquence, il n'est pas possible de conclure sur l'effet de la densité à partir du simple examen des rendements. De plus, ces résultats ne représentent que deux années et un seul lieu.

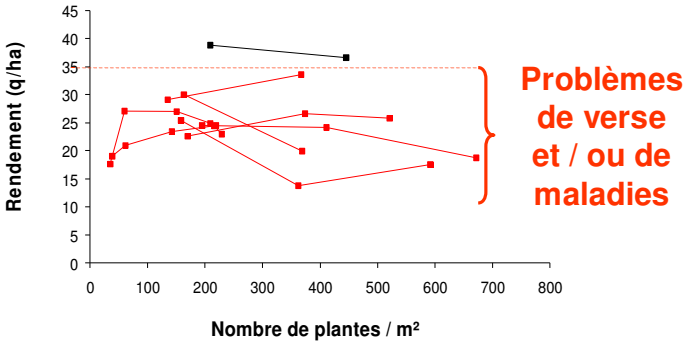


Figure 1 – Rendement en fonction du nombre de plantes / m²

L'absorption du rayonnement au début de la floraison est une variable clef dans l'élaboration du rendement. Elle détermine le potentiel de nombre de graines. Cette composante du rendement explique l'essentiel des variations de rendement en sol profond en Picardie, lorsque la verse et les maladies sont maîtrisés. Dans nos expérimentations, l'absorption du rayonnement au début de la floraison n'est pas affectée par les maladies et la verse. Ces problèmes sont en effet observés plus tard. En conséquence, l'absorption du rayonnement au début de la floraison est bien corrélée avec le nombre de plantes (Figure 2).

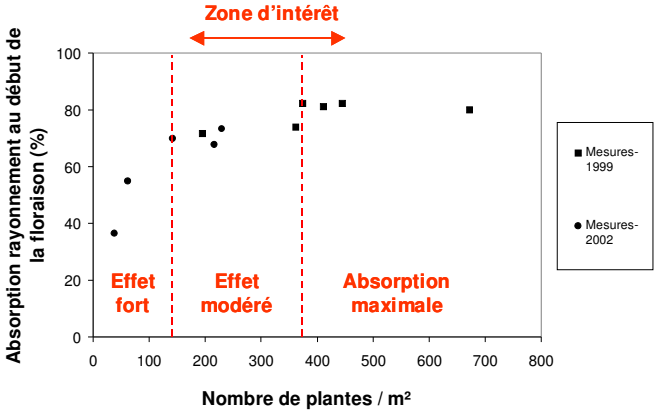


Figure 2 – Absorption du rayonnement mesurée au début de la floraison en fonction du nombre de plantes / m²

Les résultats montrent une absorption du rayonnement maximale à partir de 375 plantes / m². En deçà de ce peuplement, elle diminue peu jusqu'à 150 plantes / m². Dans les conditions des expérimentations de 1999 et 2002, les peuplements qui présentent un intérêt économique sont donc compris entre 150 et 375 plantes / m². Des peuplements inférieurs présentent des potentiels de rendement trop faibles. Des peuplements supérieurs augmentent les risques de verse et de maladie sans intérêt pour le potentiel.

Le modèle STICS permet d'étendre ces conclusions à d'autres années et d'autres lieux, car il simule correctement l'absorption du rayonnement au début de la floraison en fonction du nombre de plantes (Figure 3).

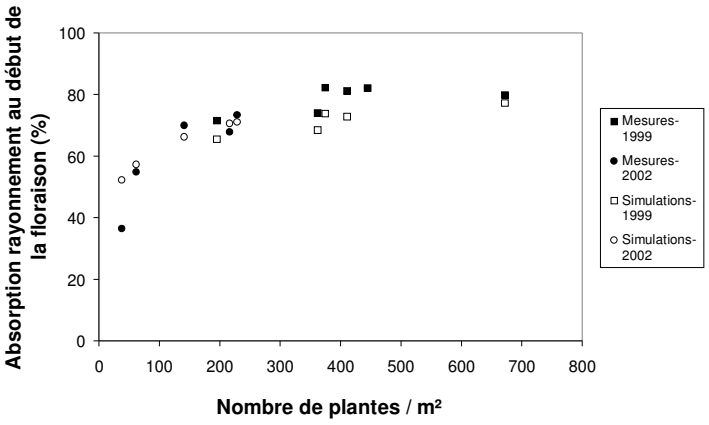


Figure 3 **–** Absorption du rayonnement mesurée et simulée au début de la floraison en fonction du nombre de plantes / m²

Les simulations d'absorption du rayonnement au début de la floraison montrent que la plupart des années la valeur maximale est approchée aux alentours de 375 plantes / m² (Figure 4). Elles confirment également que l'absorption diminue peu jusqu'à 150 plantes / m².

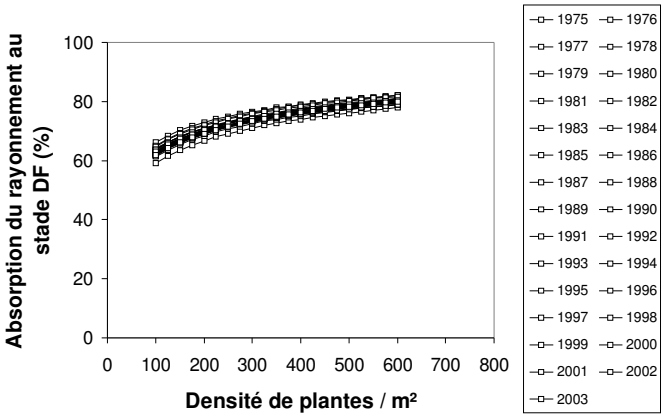


Figure 4 **–** Absorption du rayonnement simulée au début de la floraison en fonction du nombre de plantes / m²

Conclusion

Le modèle STICS permet de généraliser à un grand nombre d'années les résultats d'expérimentations conduites en 1999 et en 2002. Il s'agit d'une utilisation pertinente et appliquée du modèle STICS. Pertinente, parce que la conformité entre les simulations et les expérimentations est vérifiée ; mais aussi parce que les simulations apportent un complément par rapport aux expérimentations, la prise en compte de la variabilité interannuelle. La première application des résultats est de réviser à la baisse les peuplements : 400 plantes / m² suffisent alors que les préconisations étaient de 500 à 650 plantes / m². La deuxième application est de construire des itinéraires techniques. Une première stratégie serait de viser le rendement maximal avec 400 plantes / m². Une stratégie alternative pourrait être de baisser la densité de peuplement pour limiter les intrants et/ou les risques de ne pas contrôler la verse et les maladies, sans trop réduire le potentiel de rendement.

L'utilisation du modèle STICS présente un bénéfice certain, mais aussi un coût important (mesures expérimentales supplémentaires, adaptation de STICS et réalisation des simulations). L'intérêt apparaît davantage sur le long terme, grâce à la possibilité de valoriser le modèle pour d'autres lieux et d'autres applications. Ces utilisations nécessitent chaque fois une évaluation spécifique. Une adaptation du modèle pourrait être nécessaire dans bien des cas. Mais, les coûts induits devraient être bien plus faibles que l'investissement de départ.

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. ET 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, 311-346.

FLÉNET F., VILLON P. ET RUGET F. 2004. Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop : spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). Agronomie 24, 367-381.

Possibilités d'utilisation du modèle STICS comme outil de diagnostic du risque environnemental en culture légumière sous-abris

P. Mention * et C. Raynal **

** CTIFL, Centre de Balandran, BP 32, 30 127 BELLEGARDE, France – mention@ctifl.fr*
*** CTIFL, Centre de Lanxade, 24130 PRIGONRIEUX, France – raynal@ctifl.fr*

Dans quel contexte le Ctifl développe-t-il l'application de STICS aux cultures légumières ?

L'intérêt vis-à-vis de la protection de l'environnement s'est fortement accru ces dernières années. Pour l'opinion publique, les questions de préservation des ressources naturelles, de qualité des eaux sont devenues des sujets sensibles. Par rapport aux problèmes de qualité des eaux précisément (nitrates, résidus de produits agro-pharmaceutiques), l'activité agricole est considérée comme une activité à risques. L'évolution du contexte agro-environnemental, l'attente de résultats par rapport à l'ensemble des mesures prises pour la préservation des milieux naturels et le besoin de développer une image positive de l'agriculture soulignent la nécessité de disposer de moyens efficaces pour juger du réel impact des pratiques des agriculteurs. Contribuer à définir les bonnes pratiques visant à mieux contrôler les fuites de nitrate (irrigation et fertilisation) constitue l'enjeu essentiel de ce travail.

Quantifier le drainage et la lixiviation des nitrates hors de la zone racinaire revient à analyser les transferts d'eau et de nitrates dans les systèmes de culture. Or, ces transferts dépendent des caractéristiques du sol, de la culture en place, du climat et des techniques culturales mises en oeuvre, ce qui laisse entrevoir la complexité des phénomènes en jeu. La variabilité spatiale de certaines mesures sur le terrain, la diversité des modes de conduite et des pratiques agricoles justifient le recours à la modélisation.

Le modèle générique Stics (Simulateur mulTI-disciplinaire des Cultures Standards), conçu par l'Inra et intégrant l'ensemble de ces facteurs, a été retenu pour évaluer le risque environnemental en cultures légumières. L'étude a eu pour support une culture de laitues sous abri. La laitue a été choisie en raison de la place qu'elle occupe dans les rotations. Les cultures sous abris sont en général des systèmes à niveaux élevés d'intrants et constituent donc des milieux propices au diagnostic environnemental. Les travaux ont consisté à tester la capacité du modèle Stics à rendre compte de la lixiviation des nitrates sous culture en comparant les valeurs simulées par le modèle et les valeurs obtenues expérimentalement (dites observées). Les résultats ouvrent la voie à des applications du modèle dans le cadre des rotations légumières les plus représentées sous abris.

Bilan des simulations réalisées avec STICS en référence aux données expérimentales.

*L'étude concerne une culture de laitues (var. Locness, Vilmorin) sur sol sablo-limoneux et sous abri (tunnel 30 m * 5m). Les apports d'azote (sous forme ammonitrate) sont raisonnés d'après l'analyse des solutions de sol et les besoins des plantes. Les irrigations sont réalisés par aspersion (15 asperseurs 2L/h répartis sur 2 rampes).*

Les résultats de la modélisation sont analysés par rapport aux valeurs expérimentales et font l'objet d'une évaluation statistique (tests d'efficience du modèle) pour préciser la valeur des simulations.

- Taux de recouvrement des plantes, production de matière sèche et prélèvement en azote :

Les valeurs simulées reproduisent bien les données observées et soulignent la capacité du modèle à rendre compte de l'évolution réelle des variables considérées.

- Flux hydriques :

Les transferts en eau sont bien simulés qualitativement mais le drainage calculé reste inférieur aux résultats expérimentaux. Le modèle situe avec justesse les périodes de fort drainage. Ce phénomène est très lié aux pratiques visant à maintenir humides les mottes que colonisent les premières racines avant installation du système racinaire dans le sol. Cela se traduit souvent par des sur-irrigations et STICS reproduit sans ambiguïté le phénomène. A l'inverse, le modèle est mis en défaut dans la dernière partie du cycle cultural où ont lieu des remontées capillaires, alors que de tels mouvements hydriques ne sont pas paramétrés. A noter que ceci ne remet pas en cause le diagnostic de pertes en eau du système.

- Stocks d'azote et lixiviation des nitrates :

La simulation des stocks d'azote présente une dynamique proche des valeurs vraies mais le modèle sous-estime les quantités d'azote. Notons toutefois que ces résultats sont à relativiser en raison de la variabilité des mesures dans le sol.

Les fuites de nitrates déterminées par modélisation, se manifestent dans la première partie du cycle cultural en rapport avec le drainage qui a lieu dans le même temps. Cependant, celles ci sont sous-évaluées par le modèle. Les différences entre valeurs simulées et observées résident dans l'appréciation des flux d'eau qui déterminent les pertes en nitrates par le système de culture.

L'appréciation du risque environnemental se lit dans la concentration en nitrates des eaux de drainage et même si le modèle modère le niveau de risque, l'ordre de grandeur est respecté. In fine*, le modèle permet de situer les périodes à risque sur le plan environnemental et autorise un diagnostic en la matière.*

STICS, outil de diagnostic du risque environnemental.

Les résultats obtenus confortent l'utilisation de STICS pour évaluer le risque environnemental des pratiques dans le cadre des rotations légumières. Ainsi, les travaux sont étendus à des successions laitue d'automne hiver-melon puis laitue de printemps-engrais vert. Par ailleurs, la rotation salade-tomate, très représentée sous abri doit être analysée. Des travaux spécifiques sont en cours au Ctifl pour le paramétrage de la culture de tomate.

A terme, STICS doit permettre de :

- *cerner les situations à risque*
- *bâtir des stratégies de production à faible impact environnemental*
- *justifier de pratiques à moindre coût environnemental*

Les enjeux sont importants et des moyens appropriés devaient être mis en œuvre. C'est ainsi que l'entrée de matières organiques diverses et variées (produits du commerce, fumiers…) dans les systèmes légumiers oblige à adapter le module relatif aux minéralisations pour que STICS puisse être opérationnel dans une gamme élargie de situations.

Conclusion

Après avoir examiné la capacité du modèle à simuler les pertes en nitrates sous culture de laitue et la concentration en nitrate correspondante des eaux de drainage, nous développons un programme d'application de STICS à un ensemble de cultures légumières. En permettant de tester différents scénarios en réponse à la diversité des climats, des sols, des pratiques, ce modèle offre des perspectives intéressantes dans le domaine de l'évaluation du risque environnemental.

Bibliographie :

Bertuzzi, P et al. (2002). Infos Ctifl, 183 : 40-45.
Brisson, N. et al *(1998). Agronomie 18 : 311-346.*
Brisson, N. et al *(2002. Agronomie 22 : 69-92.*
Nicolardot, B. et al (1997) INRA éd., Paris . 87-103.

Raynal-Lacroix, C. (1995). Edition Ctifl , Paris . 150-162.
Raynal-Lacroix, C. (2003). Infos Ctifl, 189 : 46-43.

Mise au point d'un outil de modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur l'utilisation de stics et la télédétection.

V. Houlès[1]*, M. Guérif[1], B. Mary[2]

1 : *INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9.*
2 : *INRA, Unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, Rue F. Christ, 02007 Laon Cedex.*

**I-Maihil: houles@teledetection.fr ; adresse actuelle : Laboratoire GEOTROP du CIRAD/AMIS/Agronomie Maison de la Télédétection, 500, rue J.F. Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5*

Introduction

Afin de limiter les conséquences de la fertilisation azotée sur la qualité de l'eau et de l'air, la variabilité intra-parcellaire devrait être prise en compte pour préconiser des doses d'azote spatialisées, dans le cadre de l'agriculture de précision. Nous proposons donc une méthode basée sur le modèle STICS mis en œuvre à une haute résolution spatiale à l'échelle intra-parcellaire. L'objectif est de calculer la dose d'azote de telle sorte que le revenu de l'agriculteur soit maximisé et les pertes d'azote minimisées. Deux grandes étapes sont nécessaires : (i) définir une règle de décision sur la recommandation de doses d'azote ; (ii) développer une façon pratique d'estimer les entrées du modèle à l'échelle requise (Houlès, 2004).

Materials and methods

Nous supposons que pour une parcelle de 10 ha, la principale source de variabilité spatiale est le sol et négligeons l'hétérogénéité liée aux pratiques culturales et aux maladies et ravageurs.

1/ Choix d'une règle de décision basée sur l'utilisation de STICS pour recommander des doses d'azote

Afin de combiner préoccupations économiques et environnementales, nous avons choisi d'associer trois variables prédite par STICS (le rendement, la teneur en protéines des grains et la balance d'azote, c'est-à-dire la différence entre les entrées et les sorties) dans un « critère agro-environnemental ». La dose optimale d'azote est définie comme suit :

- dose d'azote maximisant la marge brute (fonction du rendement, de la teneur en protéines des grains et de la dose d'azote elle-même) ;
- dose d'azote conduisant à une valeur de la balance d'azote inférieure à un seuil donné.

Nous avons évalué l'intérêt de ce critère agro-environnemental sur 14 essais de doses d'azote caractéristiques des conditions pédo-climatiques du nord de la France (pour la plupart fournis par Arvalis – Institut du Végatal). Afin d'évaluer l'aptitude de STICS à préconiser des doses d'azote selon le critère agro-environnemental, nous avons évalué deux aspects complémentaires :

- l'aptitude de STICS à prédire les variables impliquées dans le calcul du critère agro-environnemental en prenant en compte l'incertitude portant sur le climat entre la date de décision et la récolte grâce à des séries climatiques de 30 années ;
- les conséquences de l'utilisation de STICS (par rapport à la méthode AZOBIL qui sert de référence mais qui n'inclut pas de préoccupation environnementale) sur la marge brute et sur la balance d'azote.

2/ Estimation des entrées du modèle à l'échelle intra-parcellaire

Deux parcelles agricoles ont servi de support à l'étude. La première a été cultivée en blé d'hiver en 2000 et 2002, la seconde en 2001 et 2003. En 2000 et 2001, des mesures de télédétection ont été réalisées à quatre dates au cours du cycle de culture. Des cartes de rendement ont été établies chaque année.

Deux approches différentes de caractérisation de la variabilité du sol ont été comparées : (i) une cartographie des sols par une approche pédologique ; (ii) l'utilisation des variables issues des mesures de télédétection et l'assimilation de ces données dans STICS.

(i) Des cartes des sols ont été établies à partir de la caractérisation de propriétés qualitatives des profils sur une grille. Les entrées sol du modèle ont ensuite été calculées grâce à des règles de pédotransfert déterminées sur ces parcelles.

(ii) Les méthodes d'assimilation de données consistent à estimer les entrées du modèle en minimisant les différences entre variables observées et simulées. Trois méthodes ont été comparées et la méthode GLUE (Beven & Freer, 2001) a été retenue. Les entrées sol estimées concernent la réserve utile, la croissance des racines et la teneur en azote organique du sol. Une information *a priori* sur les entrées du modèle a été utilisée : elle consiste en une gamme de valeurs possibles estimées grâce à des mesures simples. Les valeurs de *LAI* et de quantité d'azote absorbée par la culture estimées à partir de la télédétection ont servi de variables observées.

Résultats

1/ Aptitude de STICS à préconiser des doses d'azote

Le modèle prédit relativement correctement le rendement (RMSE=0.95 Mg ha^{-1}, gamme de variation observée : 1:11) et la teneur en azote des grains (RMSE=1%, gamme de variation observée : 7:14) avec un biais pour cette dernière variable. De ce fait, la balance d'azote est également assez bien prédite (RMSE = 20 kg ha^{-1}, gamme de variation observée : -100:200). Sur le jeu de données utilisé, l'incertitude portant sur le climat n'a pas d'effet significatif sur les simulations du modèle.

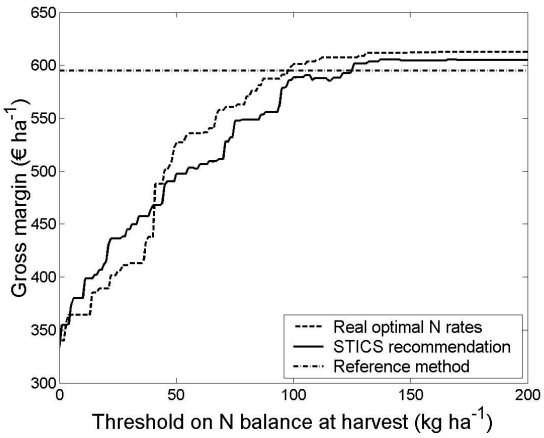


Fig. 1: Marge brute en fonction de seuils portant sur la balance d'azote

La figure 1 illustre le coût de la protection de l'environnement pour les agriculteurs : la marge brute décroît d'environ 600 €.ha^{-1} pour une faible contrainte environnementale (seuil sur la balance d'azote supérieur à 100 kg.ha^{-1}) à 500 €.ha^{-1} pour une contrainte « moyenne » (50 kg ha^{-1}) et à 350 € .ha^{-1} pour une très forte contrainte (0 kg ha^{-1}). Les doses d'azote recommandées par STICS sont proches des valeurs optimales réelles déterminées à partir des données expérimentales, et ce pour une large gamme de niveau de contrainte environnementale (c'est-à-dire différentes valeurs du seuil imposé à la valeur de la balance d'azote). La perte de marge brute obtenue avec les préconisations effectuées par STICS par rapport aux préconisations optimales réelles déterminées *a posteriori* sont assez faibles pour des contraintes moyennes mais peuvent

atteindre jusqu'à 50 €.ha^{-1} pour de fortes contraintes.

On a pu constater que la méthode AZOBIL est adaptée à une valeur de seuil sur la balance d'azote d'environ 100 kg ha^{-1}.

2/ Qualité de la spatialisation des simulations

La caractérisation des propriétés du sol à l'échelle intra-parcellaire (approche pédologique) conduit à des simulations très mal spatialisées : à des stades précoces, la variabilité du *LAI* est sous-estimée, tandis qu'à des stades ultérieurs, la variabilité du *LAI* (et par conséquent celle du rendement) est largement sur-estimée.

Les entrées du modèle estimée par l'assimilation de données conduit à des simulations biaisées, mais la variabilité spatiale est assez bien restituée. En 2001 par exemple, alors que la partie systématique de la RMSE (Willmott, 1981) est de 1.1 Mg ha^{-1} pour l'approche pédologique, elle est de 2.1 pour la méthode par assimilation (biais) ; en revanche, la partie non-systématique est de 1.3 pour l'approche pédologique et de 0.4 seulement pour l'assimilation. Le biais résultant de la mise en œuvre des méthodes d'assimilation sont probablement liées à la définition de l'information *a priori* des entrées du modèle, de la valeur attribuée aux paramètres fixés du modèle et à son formalisme.

Conclusion

L'utilisation d'un critère agro-environnemental prédit par un modèle de culture pour préconiser des doses d'azote peut aisément être adaptée à une large gamme de contraintes environnementales et donne des résultats satisfaisants. L'aspect le plus problématique concerne l'estimation spatialisée des entrées du modèle : la caractérisation classique du sol par des observations pédologique ne semble pas adéquate, ne serait-ce que par sa lourdeur de mise en œuvre aux échelles requises pour l'agriculture de précision. L'assimilation de données est une méthode prometteuse, mais requiert d'être améliorée (adaptation de formalismes du modèle). Des enjeux majeurs concernent la qualité du modèle ainsi que des observations indirectes effectuées par télédétection, et le poids relatif des deux dans le processus d'assimilation.

References

Beven K., Freer J. (2001) *Journal of Hydrology*, 249, 11-29.
Houlès, V. (2004). PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 269 p.
Willmott, C.J. (1981). *Physical Geography 2*, 184-194.

Utilisation de stics pour la mise en place d'une veille agro-climatique sur internet

Frédéric Huard [(1)], Nadine Brisson [(2)], Philippe Clastre [(2)], Jean-Pierre Guinot [(2)], Françoise Ruget [(2)], Bernard Seguin [(1)]
[(1)] *INRA, Unité AgroClim, Avignon,* [(2)] *INRA, Unité CSE, Avignon*

Suite à la canicule de 2003, la question des conséquences agricoles d'événements climatiques de grande ampleur a été de nouveau posée. Plutôt que d'y répondre au cas par cas, un projet de veille agro-climatique utilisant le modèle STICS et les données de différentes stations agrométéorologiques du réseau AgroClim a été élaboré, le résultat étant matérialisé sur un site internet : **www.avignon.inra.fr/veille-agroclimatique**. Il s'agit d'une approche purement climatique, l'objectif étant de fournir une interprétation et un suivi agronomique de la variabilité climatique à l'échelle du territoire dans un contexte temporel en évolution. Dans cet esprit, l'agriculture a été "standardisée" et simulée par des choix raisonnables mais limités de cultures, itinéraires techniques et sol. Le climat est le seul facteur de variation, les autres composantes étant considérées comme invariantes. Les résultats sont fournis chaque année après les récoltes.

Données

Les simulations ont porté sur sept cultures représentatives de la diversité de la production agricole et dix sites représentatifs des différents climats hexagonaux sur lesquels on dispose de relevés depuis une trentaine d'années minimum (Base de Données AgroClim). Pour essayer de dégager des tendances lourdes, liées entre autre au changement climatique, chaque série est décomposée : avant et après 1990 (année charnière, démontré par plusieurs études agroclimatiques) et les années récentes étant individualisées depuis l'année 2003.

Station	Période	Région	Altitude
Versailles	1970-2004	Nord	118
Toulouse	1970-2004	Sud	150
Avignon	1971-2004	Sud	24
Dijon	1970-2004	Nord	211
Rennes	1975-2004	Nord	34
Colmar	1972-2004	Nord	200
Mons	1986-2004	Nord	85
Clermont (Theix)	1991-2004	Nord	890
Lusignan	1970-2004	Sud	155
Mirecourt	1972-2004	Nord	289

Cultures	Caractéristique
Blé tendre	Culture d'hiver (céréale)
Colza	Culture d'hiver (oléagineux)
Pois	Culture de printemps (protéagineux)
Maïs pluvial	Culture d'été céréalière sensible à la sécheresse
Maïs irrigué	Culture d'été céréalière consommatrice d'eau
Tournesol	Culture d'été (oléagineux)
Prairie temporaire (graminées fourragères)	Culture pérenne

Protocole

Un protocole a été adopté utilisant un itinéraire technique standard tout en différenciant deux régions (Nord et Sud). Le tableau suivant résume les principaux éléments de ce protocole.

Culture	Région	Semis	Variété	Densité (pl/m²)	Initialisation			Fertilisation (2)	Irrigation (3)	Base tempé.
					date	Eau (1)	Azote (2)			
blé tendre	Nord	05/10	Soisson	300	01/10	80	50	200 (50-100-50)	0	0°C
	Sud	20/10	Soisson	300	01/10	80	50	200 (50-100-50)	0	0°C
colza	Nord	25/08	Goëland	130	20/08	40	35	160 (80-80)	0	0°C
	Sud	10/09	Goëland	130	20/08	40	35	160 (80-80)	0	0°C
tournesol	Nord	01/05	Précoce (1570)	7	01/04	100	35	60 (semis)	0	0°C
	Sud	01/05	Tardif (1700)	7	01/04	100	35	60 (semis)	0	0°C
maïs pluvial	Nord	20/04	DK250 (1635)	10	01/04	100	35	130 (semis)	0	6°C
	Sud	20/04	Furio (1785)	10	01/04	100	35	130 (semis)	0	6°C
maïs irrigué	Nord	20/04	DK250 (1635)	10	01/04	100	35	180 (semis)	80	6°C
	Sud	20/04	Furio (1785)	10	01/04	100	35	180 (semis	80	6°C
pois	Nord	05/03	Baccara	90	01/01	100	35	0	0	0°C
	Sud	15/02	Baccara	90	01/01	100	35	0	0	0°C
prairie	- - -	- - -	Graminées fourragères	200	01/02	100	35	100 (50/coupe)	0	0°C

(1) pourcentage de la Réserve Utile
(2) kg N/ha
(3) pourcentage des besoins

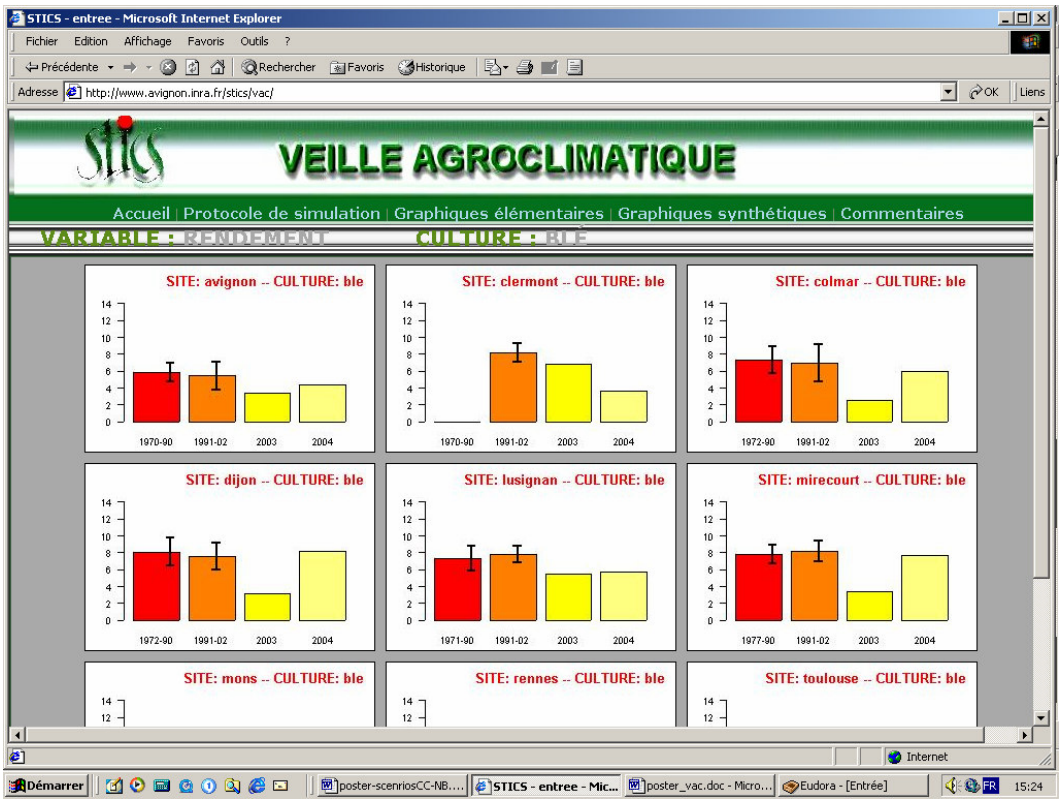
Le sol commun est un sol arable standard d'une profondeur de 120 cm, de 120 mm de réserve utile et contenant 0,12% d'azote organique. Ces caractéristiques correspondent à un sol médian d'après la carte des sols (1/1 000 000) utilisée dans ISOP. Il faut bien comprendre que ce protocole n'a pas vocation à traduire "la vérité du terrain" mais doit permettre, à travers une approche standardisée, de fournir une interprétation agronomique de la variabilité climatique.

Résultats

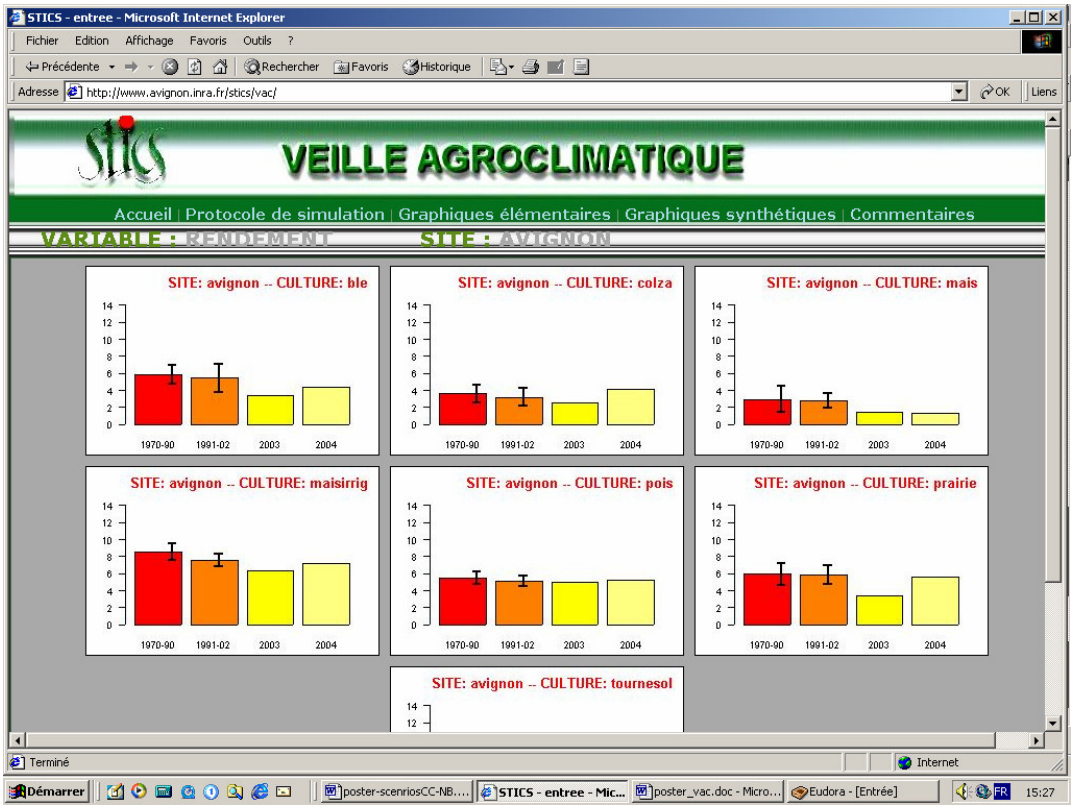
Les résultats portent sur différentes familles de variables :

Agricoles	agronomiques	agro-climatiques	environnementales
- durée de cycle	- indice de stress hydrique	- pluie	- réserve en eau
- rendement	- indice de stress azoté	- rayonnement	- réserve en azote
- qualité	- indice synthétique	- ETM	
	- nb de jours de froid	- température moyenne (> base de tempé.)	
	- nb de jours d'échaudage		

Les résultats sont sous forme de graphiques élémentaires et synthétiques.
Dans le premier cas, l'utilisateur sélectionne dans un premier temps une variable, puis choisit d'accéder aux résultats soit d'un site précis (toutes les cultures seront alors représentées) soit d'une culture en particulier (et ainsi pour tous les sites).

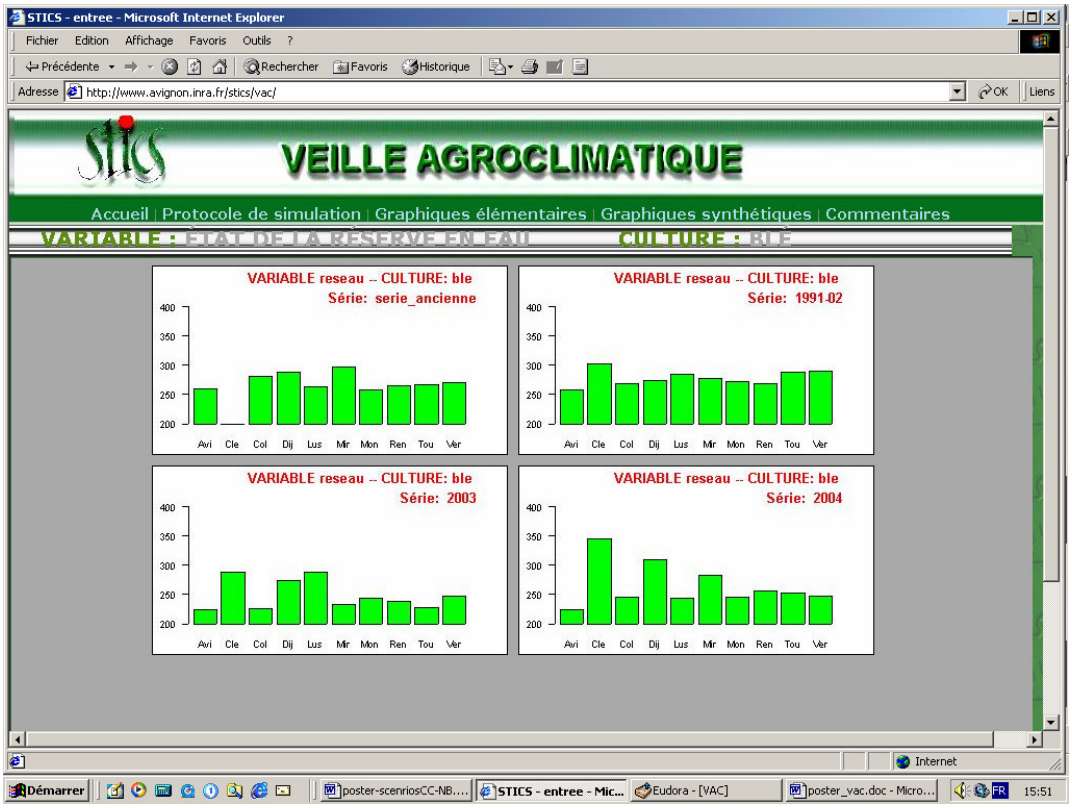


Graphique élémentaire : variable rendement, puis blé (tous sites)



Graphique élémentaire : variable rendement, puis Avignon (toutes cultures)

Pour les graphiques synthétiques, seuls la durée de cycle, l'indice synthétique, la température moyenne et l'état de la réserve en eau sont visualisables. Dans ce cas, les résultats sont présentés, pour la culture choisie, pour chacune des époques (avant 1990, 1990-2002, 2003, 2004…) et tous les sites.



Graphique synthétique (réserve hydrique pour le blé)

Conclusion

Cette veille agro-climatique va être poursuivie en 2005 et les résultats mis à jour sur le site Internet.

Il s'agit avant tout d'un outil ayant pour vocation la mise en évidence, en différents sites, de l'influence du climat sur les variables agricoles, agronomiques et environnementales à partir du modèle de simulation des cultures STICS. Nous avons choisi "l'agro-climat" comme seul facteur de variation dans notre postulat, les autres composantes étant ainsi considérées comme invariantes.

Mesure de l'ETP et prévision des pluies : quelles conséquences pour la conduite de l'irrigation du maïs ?

Frédéric LEVRAULT * – Stéphanie HANOT **
*Agrotransfert Poitou-Charentes Chambre Régionale d'Agriculture Poitou-Charentes BP 50002 86550 Mignaloux-Beauvoir
** Chambre Départementale d'Agriculture de la Charente – Maritime 3, Bd de Vladimir – 17100 Saintes, FRANCE

Contexte

En cultures irriguées, l'appréciation des pluies et de l'ETP détermine la conduite de l'irrigation dans les méthodes de type bilan hydrique. De leur juste mesure ou prévision dépendront la couverture des besoins en eau des plantes, les rendements et les volumes prélevés dans les aquifères. L'ETP sert à calculer a posteriori (souvent à la semaine) les consommations maximales des cultures : ETM = kc x ETP. Outre les incertitudes sur le coefficient cultural (Kc), la complexité du calcul de l'ETP Penman et des mesures associées peuvent introduire des biais. Ce fut le cas durant l'été 2001 en Charente - Maritime avec des valeurs sous estimées de 15 % qui ont conduit à minorer les besoins en eau des cultures. Les pluies, elles, ne posent pas de problème de mesure, mais leur prévision, si elle est fiable, peut permettre des économies d'irrigation (reports de tours d'eau).

Objectif

Au moyen du modèle STICS-COGITO, on veut préciser les enjeux pour le maïs (prélèvements d'eau pour l'irrigation et rendement en grain) liés à ces deux variables climatiques. Pour l'ETP Penman, on étudie quelle serait l'incidence sur la production et sur les prélèvements d'eau d'une sous-estimation de 15 % des valeurs utilisées par rapport à la réalité. On étudie ensuite l'incidence d'une surestimation de l'ETP de 10 %. Pour les pluies, on étudie quel serait l'impact sur les prélèvements d'eau d'une parfaite capacité de prévision. Ce travail veut illustrer l'intérêt d'un modèle de culture pour traiter de questions concrètes posées par le développement agricole. Nous insistons sur le fait qu'**il ne s'agit pas ici de polémiquer sur la plus ou moins grande qualité des données climatiques actuellement disponibles**, mais d'évaluer l'importance pour la gestion de la ressource en eau de disposer d'observations ou de prévisions climatiques les plus précises possible.

Matériel et méthode

L'étude est réalisée avec le simulateur STICS-COGITO (© CRA-PC ; INRA) développé entre 1996 et 1999 par Agrotransfert Poitou-Charentes, l'INRA, les Chambres Départementales d'Agriculture (16, 17, 79, 86), l'AGPM, l'INRA et l'ITCF. COGITO, calé et validé sur maïs et sorgho en Poitou-Charentes, est actuellement utilisé par les techniciens irrigation de la région pour analyser le fonctionnement de ces cultures en conditions hydriques limitantes (pilotage, incidence des quotas, effets des restrictions d'irrigation ou d'événements climatiques remarquables…).

L'étude traite une situation culturale courante en Charente – Maritime : sol argilo-calcaire de 75 mm de RU ; semis le 20 avril ; précocité 5. Les apports par irrigation sont de 30 mm chacun et espacés d'au moins 5 jours, ce qui autorise un débit maximal de 6 mm jour, suffisant pour couvrir les besoins de pointe. On utilise le climat de Saintes des années 1991 à 2002.

1 – Sous-estimation de 15 % de l'ETP Penman (resp. surestimation de 10 %).

Le travail se déroule en quatre étapes.

- Simulation à l'ETM avec les fichiers climatiques réels afin d'obtenir les rendements potentiels et les besoins en eau d'irrigation pour les 12 années climatiques retenues.

- Réduction de 15 % (resp. surestimation de 10%) des valeurs d'ETP Penman journalière puis simulation à l'ETM avec ces fichiers climatiques modifiés. Pour chacune des 12 années étudiées, on génère ainsi les calendriers d'irrigation que l'on aurait préconisés pour une irrigation à l'ETM si les valeurs d'ETP utilisées pour le conseil au pilotage avaient été sous-estimées de 15 % (resp. surestimées de 10 %).
- Simulation à l'ETM avec les fichiers climatiques réels mais avec les calendriers d'irrigation précédents. On simule ainsi la croissance et les besoins en eau d'une culture de maïs pour laquelle on disposerait de valeurs d'ETP Penman sous-estimées de 15 % (resp. surestimées de 10 %) par rapport à la réalité.
- Analyse fréquentielle des écarts de rendement en grain et des écarts de besoins en eau d'irrigation liés à la sous-estimation de l'ETP (resp. surestimation).

2 – Fiabilité de la prévision des précipitations

Le travail se déroule en quatre étapes.

- Simulation à l'ETM sans anticipation des précipitations. On fait fonctionner le simulateur "à l'aveugle" sans aucune anticipation des pluies pour les jours à venir. Les irrigations sont déclenchées normalement, uniquement en fonction de l'état hydrique des plantes au jour courant (suivant la valeur du facteur de stress de turgescence, TURFAC).
- Examen détaillé des fichiers climatiques et adaptation des calendriers d'irrigation. Pour chacune des années étudiées, on observe si un épisode pluvieux suit une irrigation. Si oui, l'irrigation est alors réduite d'une hauteur équivalente à la pluie suivante à condition que la lame restante permette d'assurer une consommation de 5 mm / jour jusqu'à l'arrivée de la pluie. Par exemple, l'apport de 30 mm le 15 juillet (suivi d'une pluie de 22 mm le 17 juillet) n'est pas réduit de 22 mais de 20 mm afin de permettre une consommation de 5 mm/jour du 15 au 17 juillet.

Ce mode d'anticipation des pluies correspond à une capacité parfaite de prévision des pluies, donc fictive. On notera que l'on s'affranchit ici des questions de délai de prévision et de fiabilité : le délai est d'au maximum 6 jours (30 mm par apport) et la fiabilité totale. Dans notre étude, cette anticipation est reconstituée a posteriori sur des années déjà écoulées. Le tableau 1 détaille les adaptations des irrigations comprises entre le 15 juin et le 15 juillet pour

		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
15	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,2	4,0	0,0
16	6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	0,0	7,2	0,2
17	6	2,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0
18	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,4
19	6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	10,4
20	6	1,0	0,4	0,0	0,0	0,2	0,0	4,2	0,0	0,4	3,4	0,0	0,0
21	6	2,2	5,6	1,2	0,0	0,0	31,8	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	6	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
23	6	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	6	0,0	0,6	0,0	18,2	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,2	0,0	0,0
25	6	0,6	0,0	0,0	9,6	0,0	0,0	10,0	0,0	2,2	4,8	0,0	0,0
26	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
27	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	7,4	0 (30)	0,0	0,0
28	6	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
29	6	0,0	31,4	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0	0 (22)	0,8	0,2	0,0	0,0
30	6	0,0	7,8	3,4	0,0	0,0	0,2	1,2	0,0	0 (20)	0,0	0,0	0 (23)
1	7	1,2	8,0	0,0	0,2	3,6	0,2	3,6	5,2	0,0	0,2	0 (15)	2,6
2	7	7,6	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	5,4	2,0	0,0	0,0	0,0	1,2
3	7	0,0	0,2	0 (30)	0,0	13,2	6,2	3,0	1,6	0,0	13,4	0,2	3,6
4	7	0,0	4,4	0,0	0,0	0,0	2,6	6,0	0,2	5,8	3,2	14,4	0,0
5	7	3,8	6,8	0,4	0,0	0,0	8,8	0,2	0,0	5,8	0,4	0,4	6,8
6	7	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,0	2,0	0 (5)	4,6	0,2
7	7	0,0	0,0	0,0	0 (30)	0,0	7,4	0,0	0,2	0,0	14,4	5,2	0,0
8	7	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0 (20)	0,0	0,2	0,2
9	7	0,0	1,4	1,6	0,0	0,0	0,4	0,0	0,2	0,0	20,2	0,0	4,4
10	7	0,0	21,6	0 (25)	0,0	20,0	0,6	3,8	0,2	0,0	6,0	0,4	0,0
11	7	0,0	2,6	3,2	0,0	0,0	0,0	3,8	0,2	1,2	2,4	0,0	0,0
12	7	0 (30)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	51,8	0,0	3,4	1,2
13	7	3,0	0,0	1,4	0 (30)	0,4	0,0	2,8	2,6	0,0	1,8	13,8	0,0
14	7	0,4	0,0	0,0	0,0	2,8	0 (30)	0,0	0 (30)	0,0	1,2	9,2	0,0
15	7	0,0	0,4	0,0	0,0	13,8	0,0	0,0	0,2	0,6	0,0	0,0	0 (30)

les 12 années étudiées.

Tableau 1 : précipitations journalières à Saintes du 15 juin au 15 juillet de 1991 à 2002.

Cases en fond bleu : dates d'irrigation proposées par COGITO pour une conduite à l'ETM. Valeurs entre parenthèses : irrigations corrigées pour anticiper les pluies.

- Simulation avec les calendriers d'irrigation adaptés pour anticiper les pluies. Les dates et doses d'irrigation précédemment établies sont imposées au simulateur afin de simuler une capacité parfaite d'anticipation des pluies. Notons que la règle d'anticipation utilisée vise à éviter le drainage qu'entraînerait une pluie sur un réservoir sol plein. Elle peut cependant réduire le remplissage du sol sur l'ensemble du cycle cultural. C'est pourquoi l'on a vérifié que cette anticipation des pluies par réduction des doses d'irrigation n'affecte pas la production de plus de 2 à 3 %. Lorsque c'est le cas, les réductions des apports sont revues.
- Analyse des économies d'irrigation. On calcule pour chacune des années étudiées la réduction (éventuelle) des besoins en eau d'irrigation liée à la prédiction des pluies. Une analyse statistique est ensuite opérée sur ces écarts.

Résultats concernant l'ETP

1 – Sous-estimation de l'ETP de 15 %

Le tableau 2 présente, année par année, les rendements en maïs grain et les besoins en eau d'irrigation simulés par STICS-COGITO avec les valeurs vraies d'ETP puis sous-estimées de 15 %.

Résultats à l'ETM avec vraies ETP

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1er Q	méd	4ème Q
Irrigation (mm)	360	210	270	210	360	270	210	270	300	240	180	210	210	255	294
Rendement (Q/ha)	126	135	137	124	132	146	129	134	140	134	126	134	127	134	137
ETR/ETM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Résultats à l'ETM avec ETP sous-estimées de 15 %

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1er Q	méd	4ème Q
Irrigation (mm)	*270*	*150*	*210*	*180*	*270*	*210*	*180*	*210*	*240*	*210*	*150*	*150*	156	210	234
Rendement (Q/ha)	*113*	*131*	*127*	*116*	*119*	*140*	*122*	*126*	*128*	*123*	*120*	*127*	119	125	128
ETR/ETM	*0,92*	*0,95*	*0,93*	*0,95*	*0,93*	*0,94*	*0,96*	*0,93*	*0,92*	*0,92*	*0,96*	*0,94*	0,92	0,94	0,95

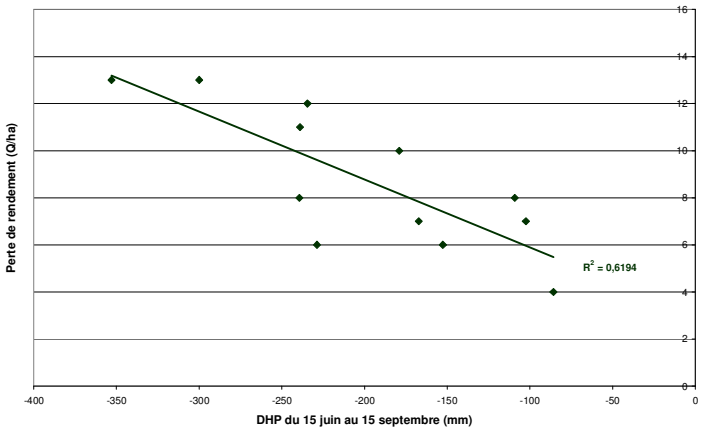
Ecart

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1er Q	méd	4ème Q
Irrigation (mm)	90	60	60	30	90	60	30	60	60	30	30	60	30	60	60
Rendement (Q/ha)	*13*	*4*	*10*	*8*	*13*	*6*	*7*	*8*	*12*	*11*	*6*	*7*	6	8	12

Tableau 2 : rendements en grain et besoins en eau d'irrigation avec ETP vraies puis sous-estimées de 15 %. Saintes Groie 75 mm Années 1991 à 2002.

La sous-estimation de 15 % de l'ETP entraîne, par sous-estimation des besoins en eau des cultures, une baisse de rendement en grain qui dépasse 8 Q/ha une année sur deux et 12 Q/ha une année sur cinq. La perte de rendement varie du simple au triple suivant l'année : 4 Q/ha en 1992 ; 13 Q/ha en 1995. La figure 1 montre que cette perte est proportionnelle à la sécheresse de l'année concernée.

Figure 1 : relation entre la perte de rendement liée à une sous-estimation de l'ETP de 15 % et le déficit hydrique potentiel du 15 juin au 15 septembre. Saintes Groie 75 mm RU Années 1991 à 2002.



2 – Surestimation de l'ETP de 10 %

Le tableau 3 présente, année par année, les rendements en maïs grain et les besoins en eau d'irrigation simulés par STICS-COGITO avec les valeurs vraies d'ETP puis surestimées de 10 %.

Résultats à l'ETM avec vraies ETP

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1er Q	méd	4ème Q
Irrigation (mm)	360	210	270	210	360	270	210	270	300	240	180	210	210	255	294
Rendement (Q/ha)	126	135	137	124	132	146	129	134	140	134	126	134	127	134	137
ETR/ETM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Résultats à l'ETM avec ETP surestimées de 10 %

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1er Q	méd	4ème Q
Irrigation (mm)	360	270	300	240	390	330	240	300	330	300	210	270	246	300	330
Rendement (Q/ha)	122	134	137	121	131	144	128	132	138	132	122	129	123	132	136
ETR/ETM	0,98	1	1	0,99	0,99	1	1	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1

Ecart

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1er Q	méd	4ème Q
Irrigation (mm)	0	60	30	30	30	60	30	30	30	60	30	60	30	30	60

Tableau 3 : rendements en grain et besoins en eau d'irrigation avec ETP vraies puis surestimées de 10 %. Saintes Groie 75 mm Années 1991 à 2002.

La surestimation de 10 % de l'ETP entraîne, par surestimation des besoins en eau des cultures, un accroissement de l'irrigation qui dépasse 30 mm une année sur deux et 60 mm une année sur cinq. Dans un tel scénario, l'impact sur les aquifères serait important. En termes de rendement en grain, on constate une légère baisse liée à l'incapacité du débit journalier maximal (6 mm/jour) à satisfaire des besoins à l'ETM devenus très élevés du fait de l'accroissement artificiel de l'ETP.

Résultats concernant la prévision des précipitations

Le tableau 3 présente, année par année, les rendements en maïs grain et les besoins en eau d'irrigation simulés par STICS – COGITO sans puis avec anticipation des précipitations.

Résultats sans prévision des pluies

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Irrigation (mm)	360	210	270	210	330	270	210	270	240	240	240	210
Rendement grain (Q/ha)	124	135	136	124	130	144	128	134	122	137	121	132
ETR/ETM	0,98	1,00	0,99	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00	0,99	1,00	0,98	1,00

Résultats avec prévision des pluies

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Irrigation (mm)	330	140	225	185	320	245	180	235	215	228	202	170
Rendement grain (Q/ha)	122	133	132	123	127	144	127	131	117	137	117	128
ETR/ETM	0,97	0,96	0,95	0,99	0,97	0,97	0,99	0,97	0,96	0,99	0,95	0,96

Différentiel

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1er quint	médiane	4ème quint
Irrigation (mm)	30	70	45	25	10	25	30	35	25	12	38	40	25	30	40
Rendement grain (Q/ha)	2	2	4	1	3	0	1	3	5	0	4	4	1	3	4

Tableau 3 : rendements en maïs grain et besoins en eau d'irrigation simulés par STICS – COGITO avec ou sans prévision des pluies. Saintes – Groie 75 mm RU – Années 1991 à 2002.

Observons que la méthode utilisée pour anticiper les pluies ne permet pas de maintenir les rendements à leur potentiel : 2,4 Q/ha sont perdus en moyenne sur 12 ans. Notre mode d'anticipation des pluies est en cause : lorsqu'une pluie est anticipée dans l'irrigation précédente (i1), l'irrigation suivante (i2) n'est pas avancée bien que la somme "pluie + i1" soit inférieure. Dans les cas où cette somme ne remplit pas totalement le sol, l'apparition du stress hydrique est avancée et une réduction de croissance intervient jusqu'à l'irrigation suivante (i2). L'effet cumulé de ces réductions au long du cycle cultural se traduit par une légère baisse du rendement en grains.

L'anticipation des pluies permet une économie d'irrigation de 30 mm une année sur 2 et de 40 mm une année sur cinq. Si l'on s'était imposé le strict maintien des rendements, l'économie d'irrigation aurait été moindre. Cette économie apparaît modérée par rapport à l'analyse qu'en font les techniciens irrigation et les irrigants de la région Poitou-Charentes. Trois facteurs combinés expliquent ce résultat :

1) l'anticipation d'une pluie ne peut pas se faire plus de 5 à 6 jours à l'avance compte tenu de la dose par apport (30 mm) ; au delà, un nouvel apport par irrigation intervient ;
2) la probabilité qu'une pluie significative se présente dans un délai aussi bref n'est pas très élevée durant l'été : sur 102 apports réalisés entre 1991 et 2002 (en moyenne 8,5 par an) seuls 44 ont pu faire l'objet d'une réduction de dose (en moyenne 3,7 par an) ;
3) la réduction de dose par apport est assez modérée : 385 mm pour 44 irrigations soit 9 mm en moyenne.

Ainsi, la question de l'économie d'irrigation liée la prévision des pluies ne se pose pas de façon continue sur l'ensemble du cycle. C'est à l'intérieur de périodes de 5 à 6 jours définies par les dates d'irrigation, que la présence ou non de pluies peut offrir une possibilité d'économie d'irrigation.

Conclusion

Dans les conditions de l'étude, les enjeux pour la culture du maïs liés à l'ETP et aux précipitations sont, une année sur deux (médiane) :

- une perte de 8 Q/ha en cas de sous-estimation de l'ETP Penman de 15 % ;
- une surconsommation d'eau de 30 mm en cas de surestimation de l'ETP de 10 % ;
- une économie d'irrigation 30 mm en cas d'anticipation parfaite des précipitations.

L'importance d'estimations précises de l'ETP se vérifie. Cette précision est indispensable aux conseillers et irrigants pour une utilisation optimale de la ressource en eau sur les plans économique et environnemental. La prévision des pluies recouvre un enjeu moins important que l'on pouvait penser a priori. Elle ne doit toutefois pas être négligée car elle peut permettre ponctuellement des économies significatives, d'autant plus nécessaires que la situation hydrologique est tendue.

Application de STICS à la gestion de l'eau d'irrigation dans les conditions de Marrakech

R. Hadria*[1], S. Khabba[1], A. Lahrouni[1], B. Duchemin[2], S. Er-Raki[1], J. Ezzahar[1], AG.. Chehbouni[2], J. Carriou[2], L. Ouzine[3]

[1]*FSS – Faculté des Sciences Semlalia, BP. 2390, Marrakech, Maroc*
[2]*CESBIO – Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, France*
[3]*ORMVAHA – Office régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz, Marrakech, Maroc*
**Corresponding author email: r.hadria@ucam.ac.ma*

Introduction

L'agriculture et l'agro-industrie représentent les activités principales de la population Marocaine. Dans ce contexte, les céréales sont dominants et ont couvert 59% des superficies labourées durant la décennie de 1990-2000. La majorité de ces superficies sont localisées dans des zones arides comme la plaine de Tensift El Haouz. Dans cette dernière, le blé couvre plus de 60% de la surface totale réservée aux céréales.

La rareté des ressources en eau représente un facteur limitant de la production de cette culture vitale. En effet, la zone est caractérisée par une importante demande évaporatoire (1600mm/an) et par des faibles précipitations annuelle (240mm/an). Pour surmonter cette déficience hydrique et la mauvaise distribution des pluies durant la saison agricole, l'Office Régional de Mise en Valeur agricole du Haouz (ORMVAH) se charge de la distribution d'eau des barrages aux agriculteurs. Des calendriers des dates d'irrigation sont fixés au début de chaque saison agricole en collaboration entre les techniciens de l'ORMVAH et les agriculteurs. Le nombre d'événements d'apport d'eau ainsi que les quantités d'eau apportées dépendent du niveau d'eau des barrages. Ainsi, l'optimisation d'eau d'irrigation présentera une étape importante vers la résolution des problèmes liés à la rareté des ressources en eau dans la région.

Cette étude vise à exploiter la capacité du modèle de culture STICS (Brisson et al., 2003) à gérer l'eau d'irrigation. Ainsi, nous avons d'abord calibré et validé le module de développement du modèle à partir des données collectées dans la zone du Haouz. Ensuite, nous avons utilisé le modèle comme un outil de simulation pour illustrer les pertes d'eau et du rendement causées par les pratiques d'irrigation et de fertilisation utilisées dans la plaine de Tensift El Haouz.

Matériels et méthodes

Le site expérimental est localisé dans la plaine du Haouz au centre du Maroc, à 40 Km à l'Est de la ville de Marrakech. C'est une zone irriguée, à 2800 ha de superficie, gérée par l'ORMVAH depuis 1999. Les céréales sont les cultures principales et le blé est la culture la plus dominante. Il est généralement semé entre le 15 novembre et le 15 janvier selon le début de la saison des pluies.

Dans le cadre du projet SudMed (Chehbouni et al., 2003), deux campagnes de mesures ont eu lieu dans la zone d'étude durant les deux saisons agricoles 2002/03 et 2003/04. Une synthèse des mesures effectuées et les premières analyses des résultats obtenus sont détaillés par Duchemin et al., (sous presse). Durant les deux saisons, nous avons réalisé un suivie de l'évolution de l'indice foliaire (LAI) de trois parcelles durant 2002/03 et six parcelles durant 2003/04. A la fin de chaque saison, nous avons mesuré le rendement en grain de chaque parcelle. Les données collectées durant la saison 2002/03 ont été utilisées pour calibrer le module de développement et de rendement du modèle STICS. La validation de ce dernier est

faite à partir des données de 2003/04. Les trois parcelles de calibration sont notées par C1, C2 et C3 et les six de validations sont notées par V1 à V6 dans (Hadria et al., soumis à *The Arabian Journal for Science and Engineering (AJSE)*). Les données climatiques nécessaires à l'exécution de STICS ont été mesurées par une station météorologique installée dans la zone d'étude durant les deux campagnes expérimentales.

Résultats

Calibration du module de développement et de rendement de STICS

A fin de caractériser la variété du blé la plus pratiquée dans la plaine du Haouz, nous avons calibré cinq stades phénologiques qui contrôlent l'évolution du LAI (Brisson et al., 1998). Nous avons utilisé la méthode du Simplex (Nelder et Mead, 1965) pour optimiser les temps thermiques qui séparent les stades phénologiques suivants : entre la levée (LEV) et le début d'extension maximale des feuilles (AMF); entre le stade AMF et le stade du LAI maximal (LAX); entre le stade LAX et celui de début de la sénescence nette des feuilles (SEN), et finalement entre le stade SEN et le stade d'indice foliaire nul (LAN). Pour calibrer le rendement, nous avant calibré le temps thermique qui sépare les stades (LEV) et le stade début de remplissage des grains (DRP).

Les temps thermiques obtenus sont réduit d'environ 30% par rapport à ceux obtenus par Brisson et al. (2002) pour des variétés tempérées. Ce qui est cohérent avec le fait que la variété utilisée est précoce; adaptée à la zone semi aride de la plaine du Tensift El Haouz.

Une fois les temps thermiques sont calibrés, nous avons utilisé leurs valeurs moyennes comme paramètres d'entrée de STICS pour tester le modèle à partir des données collectées sur les six parcelles de validation. A ce stade, on ajuste seulement le paramètre (DLAIMAX) qui contrôle le taux de production de la surface foliaire. Les résultats obtenus ont montré qu'on a réussi à calibrer le module de développement et de rendement du modèle STICS (Hadria et al., soumis à *AJSE*).

Application : utilisation de STICS pour gérer l'eau d'irrigation

En utilisant STICS en mode irrigation automatique, le modèle peut fournir un calendrier d'irrigation en fixant l'indice de déclanchement d'irrigation, RATIOL, à une valeur de stress qu'il ne faut pas dépasser. Ainsi, nous avons mis en évidence la relation liant le rendement du blé au seuil de stress toléré. Ce travail concerne deux parcelles : la parcelle V2 à semis considéré précoce (21 Novembre 2003) et la parcelle V3 à semis considéré tardif (15 Décembre 2003). Nous avons testé huit valeurs de RATIOL comprises entre 0.3, où le modèle reste à son rendement minimal, et 1. Les simulations ont été effectuées en utilisant les données climatiques de la saison 2003/04. Pour éviter l'interférence des effets des stress hydrique et azoté, nous n'avons pas pris en compte l'effet du stress azoté dans le modèle. Des valeurs notées ci-après par rendement et biomasse de référence correspondent aux valeurs estimées pour les deux parcelles lorsqu'on tient compte des irrigations observées (60mm **x** 3 irrigations) et en négligeant l'effet du stress azoté.

La figure 1 présente les résultats des simulations de la biomasse et du rendement, obtenus pour les deux parcelles V2 et V3, en fonction de RATIOL. Les valeurs de Référence de la biomasse et du rendement sont aussi présentées sur la courbe par une ligne horizontale en pointillée. Comme attendu, la quantité d'eau simulée (ou le nombre d'irrigations) augmente avec le seuil du stress hydrique. Aussi, la biomasse et le rendement augmentent avec RATIOL jusqu'à ce qu'ils atteignent leurs valeurs maximales permises par le modèle.

Les simulations montrent une large différence entre les états de stress hydrique des deux parcelles selon leurs dates de semis. La dynamique de la biomasse et du rendement est plus

importante pour V3 que pour V2. En parallèle, la quantité d'eau d'irrigation de V3 est toujours supérieure à celle de V2. Elle est par exemple égale 110mm pour V2 et 230 mm pour V3 dans le cas de RAIOL égale à 1. Cela peut être dû à deux raisons :1) la parcelle précoce V2 a bénéficié d'un important stock en eau initial du sol grâce aux pluies de début de saison (Hadria et al., soumis à *AJSE*). 2) la seconde explication est lié au climat : la demande évaporatoire est plus importante à la fin de la saison et c'est la parcelle V3 qui en souffre le plus par rapport à V2 car le blé de cette dernière a fini son cycle de croissance avant celui de V3.

La figure 1 nous permet de quantifier le gain en quantité d'eau qu'on peut économiser en choisissant le semis précoce: en comparant les quantités d'eau nécessaires pour obtenir les rendements et les biomasses de référence, et celles réellement utilisées (180mm), les valeurs de références sont obtenues à partir de 110 mm d'eau pour V2 et 140 mm pour V3. Donc, un gain de 70mm et 40mm pour V2 et V3 respectivement.

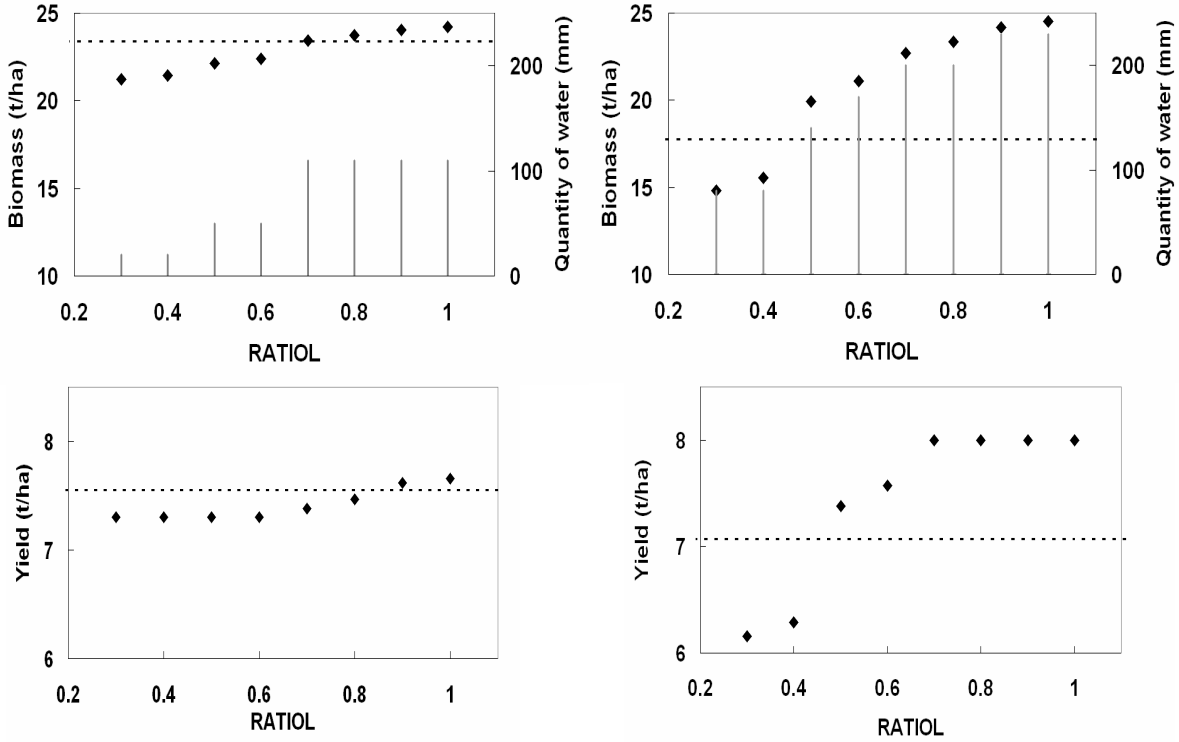


Figure 1. Les biomasses et les rendements estimés pour les parcelles : précoce, V2, (à gauche) et tardive V3, (à droite) et les quantités d'eau estimées par STICS (les lignes verticales dans les deux courbes en haut) en fonction de RATIOL. Les lignes horizontales représentent les valeurs de référence de biomasse et de rendement obtenus lorsqu'on utilise les irrigations réelles et sans l'effet du stress azoté

Conclusion

Dans ce travail, la caractérisation de la variété du blé, semée dans la zone semi aride du Haouz, est réalisée. Les paramètres variétaux nécessaires à STICS pour simuler correctement l'indice foliaire et donc l'evapotranspiration réelle ont été calibrés sur les données collectées durant la saison 2002/03 et validés à partir des données collectées durant la saison 2003/04. Un tel résultat sera fort utile pour les utilisateurs qui souhaiteront appliquer le modèle STICS pour estimer l'évapotranspiration et le rendement du blé dans les conditions semi arides de la plaine du Haouz en particulier, et du Maroc en général.

Dans la deuxième partie de cette étude, un exemple d'application du modèle, pour gérer l'eau d'irrigation dans notre zone d'étude, a été présenté. Nous avons illustré le gain en rendement

et en biomasse lorsqu'on adopte les semis précoces et le gain en eau lorsqu'on utilise le modèle pour estimer les dates d'irrigation. Ces résultas, bien qu'ils semblent préliminaires et nécessitent une validation, ils illustrent l'utilité de l'adoption du modèle, par les offices agricoles, comme outil de gestion de l'eau d'irrigation dans notre zone semi aride.

Remerciement

Cette étude est soutenue par le 5éme PCRD de l'union européen via les programmes WATERMED ("WATer use Efficiency in natural vegetation and agricultural areas by Remote sensing in the MEDiterranean basin", http://www.uv.es/ucg/watermed) et IRRIMED ("Improved management tools for water-limited irrigation: combining ground and satellite information through models", http://www.irrimed.org.

Références

Brisson, N., et al. (1998). Agronomie, 18, 311-346
Brisson N., et al. (2002). Agronomie, 22, 69-92.
Brisson, N., et al. (2003). European Journal of Agronomy, 18, 309-332.
Chehbouni A., al., (2003). EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Nice, France.
Duchemin B., et al. (In press). Agricultural and Water Management.
Hadria, R. (submitted). International Journal of Remote Sensing.
Hadria, R., et al. (submitted). Arabian Journal for Science and Engineering.
Nelder, J. A., Mead, R., (1965). Computer. Journal, 7, 308-313.
Rodriguez, J.C. et al. 2004). Agronomie, 24, 295–304.

Epistics : Mise au point d'un modèle pour générer des calendriers d'irrigation et de fertilisation en vergers de pommiers

Thomas NESME[1,3,*], Nadine BRISSON[2], Françoise LESCOURRET[1], Stéphane BELLON[1], Robert HABIB[1]

[1] *unité PSH, INRA domaine St Paul, 84914 Avignon cedex 9*
[2] *unité CSE, INRA domaine St Paul, 84914 Avignon cedex 9*
[3] *adresse actuelle : ENITA de Bordeaux, BP 201, 33175 Gradignan cedex*
[*] *auteur correspondant : t-nesme@enitab.fr*

Introduction

L'analyse des pratiques des agriculteurs, re-situées dans le système plante-milieu-technique, entre dans le champ de l'agronomie. Cette analyse permet, entre autres, d'identifier les objectifs et contraintes auxquels font face les agriculteurs, afin de proposer des innovations techniques qui puissent tenir compte de ces contraintes. Une méthode d'analyse quantifiée de ces pratiques (évaluation d'une part, compréhension de leurs déterminants d'autre part) peut reposer sur la confrontation entre les pratiques des agriculteurs et des pratiques théoriques générées par un modèle de culture (Nesme et al, 2005). Cette confrontation sert alors de base à des entretiens avec les agriculteurs sur ce qu'ils font et leurs raisons.
Nous avons choisi d'appliquer cette démarche au cas de l'arboriculture où de nombreux enregistrements de pratiques d'agriculteurs sont disponibles. L'irrigation et la fertilisation azotée ont été les deux techniques choisies en raison de leur importance dans le pilotage des systèmes de culture pérennes et de leur impact potentiel sur l'environnement. A notre connaissance, il n'existe pas de modèle de culture capable de générer des calendriers d'irrigation et de fertilisation azotée en arboriculture. Il a donc fallu mettre au point un tel modèle, dont la conception et l'évaluation sont présentées dans ce poster.

Présentation du modèle

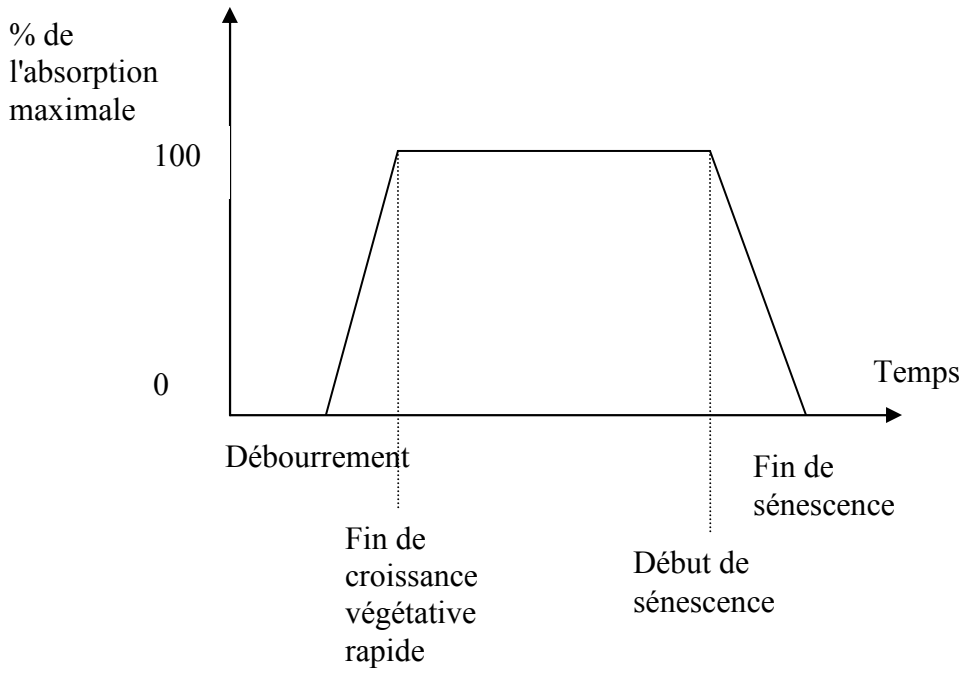
Principes généraux

Epistics dérive du modèle Stics (Brisson et al, 1998) dont il conserve la partie sol, c'est-à-dire la simulation du bilan hydrique et azoté. La simulation des parties aériennes (production de biomasse, élaboration du rendement) est ainsi shuntée et les besoins en eau et en azote du couvert végétal sont données en entrée. Le modèle est prévu pour simuler le comportement d'une parcelle de pommiers adultes associant arbres sur le rang et couvert herbacé pérenne sur l'inter-rang. Il se compose d'une partie 'biophysique', calculant le bilan hydrique et azoté de la parcelle, couplée à deux règles de décision, utiles pour générer les calendriers d'irrigation et de fertilisation. Le principe et le mode de calcul du bilan hydrique et azoté sont inchangés par rapport à Stics.

Estimation des besoins en eau et en azote

Les besoins en eau et en azote sont des entrées du modèle. Leur estimation se fonde sur une méthode simple, rendant possible l'utilisation du modèle sur un grand nombre de parcelles.
Pour le bilan hydrique, le système d'étude considéré est le stock d'eau du sol de l'ensemble du verger (herbe et arbres). L'estimation des besoins se fait alors à l'aide de coefficients culturaux (k_c) variables dans le temps et calculés pour les vergers enherbés.
Pour le bilan azoté, le système d'étude considéré est le stock d'azote minéral du sol situé sous le rang d'arbres. Ceci implique que l'herbe et les arbres n'entrent pas en compétition pour l'azote et qu'il n'existe pas de transferts latéraux d'azote du sol entre la partie sous l'herbe et la

partie sous les arbres. L'estimation des besoins totaux en azote se fait à partir d'une estimation de l'azote prélevé par un arbre pour former ses feuilles, ses fruits, ses bois de taille et ses parties pérennes, et en tenant compte de la densité de plantation. Les besoins totaux en azote sont alors répartis dans le temps selon la fonction trapézoïdale suivante :



Règles de décision pour générer des calendriers

Deux règles de décision sont couplées à la partie 'biophysique' du modèle pour générer des calendriers d'irrigation et de fertilisation azotée.

Une irrigation est déclenchée dès que l'indice de stress calculé par le modèle (ratio entre transpiration réelle calculée et transpiration potentielle calculée) tombe en dessous d'une valeur seuil défini par l'utilisateur, comprise entre 0 et 1. La quantité générée correspond à la quantité d'eau nécessaire pour remplir le sol jusqu'à la capacité au champ.

Pour la fertilisation, le modèle calcul chaque jour la demande en azote prévisionnelle du couvert sur les n_{day} prochain jours et l'offre prévisionnelle en azote du sol (stock d'azote et minéralisation de la matière organique et des résidus) sur la même période. Puis l'offre prévisionnelle est comparée à la demande prévisionnelle multipliée par $ratio_N$, ce dernier paramètre, défini par l'utilisateur, étant supérieur ou égal à 1 et pouvant être compris comme un paramètre 'd'assurance'. La quantité générée par le modèle est alors :

$$\frac{Ratio_N \times Demande - Offre}{efficience_{engrais}} > Dose_{\min}$$

Avec une efficience de l'engrais calculée par le modèle et une dose minimum ($Dose_{min}$) définie par l'utilisateur.

Evaluation du modèle

Seule la partie 'biophysique' du modèle a été évaluée. L'évaluation a porté sur la capacité du modèle à reproduire (i) la dynamique de la teneur en eau et en azote du sol pendant la période estivale sur 12 parcelles en 2003 et (ii) le reliquat d'azote minéral et d'eau du sol en fin d'hiver 2002 et 2003 sur une cinquantaine de parcelles. L'ensemble des parcelles prises en considération étaient situées dans la plaine de Mauguio-Lunel (Hérault, France).

Résultats et Discussion

Le modèle a présenté de relativement bonnes capacités à prédire la dynamique de teneur en eau du sol (RMSE moyenne sur 12 parcelles de 3,6 et 3,4 % pour les horizons 0-30 et 30-60cm, respectivement). L'estimation des teneurs en eau du sol en fin d'hiver a montré une RMSE moyenne de 3 et 3,6% pour 2002 et 2003, respectivement, avec un biais significatif pour le 1er horizon. La différence entre teneurs en eau du sol prédites et observées semble provenir, pour une partie, des erreurs d'imprécision sur les dates d'irrigation réalisées par les agriculteurs.

Le modèle a présenté globalement une capacité à reproduire l'ordre de grandeur des teneurs en azote du sol : la RMSE entre valeurs prédites et observées de teneur en azote du sol au cours de l'été 2003 était de 29 kgN-NO_3^-/ha en moyenne sur 12 parcelles. La RMSE calculée sur les reliquats de sortie d'hiver était de 64 et 49 kgN-NO_3^-/ha/an pour 2002 et 2003, respectivement. Ces résultats montrent que le modèle est capable de reproduire la dynamique de l'azote minéral du sol et de classer correctement les horizons de sol selon leur teneur en azote. L'erreur du modèle est acceptable comparée à la forte variabilité spatiale de l'azote minérale du sol et à l'erreur de 15 kgN-NO_3^-/ha due au transport, stockage, préparation et analyse de l'échantillon (Ilsemann et al, 2001).

Le modèle a donc montré sa capacité à générer des calendriers d'irrigation et de fertilisation azotée en arboriculture fruitière en s'appuyant sur une simulation correcte des teneurs en eau et en azote du sol. Les calendriers générés sont alors apparus comme des outils efficaces pour interroger les agriculteurs sur leurs pratiques et leurs déterminants (Nesme, 2004).

Références

Brisson et al, 1998. Stics : a generic model for the simulation of crops and their water and N balances. 1: theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.

Ilsemann, J., Goeb, S., Bachmann, J. 2001. How many soil samples are necessary to obtain a reliable estimate of mean nitrate concentration in an agricultural field? J. Plant Nutr. Soil Sci. 164, 585-590.

Nesme, T., Bellon, S., Lescourret, F., Senoussi, R., Habib, R. 2005. Are agronomic model useful for studying farmers' fertilisation practices? *Agric. Syst*., 83, 297-314

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 doctorat, Montpellier, 175p.

Evaluation du modèle STICS en tant qu'outil d'aide à la gestion environnementale des pollutions diffuses par le nitrate d'origine agricole.

P-Y. Bernard*, S. David

INRA, Station de Mirecourt, 662, Av. Louis Buffet, 88500 MIRECOURT, France.
**Email de l'auteur : bernard@mirecourt.inra.fr*

Introduction

En Lorraine, comme dans nombre de régions françaises, les agents du développement agricole mettent en place des opérations agro-environnementales afin de réduire les risques de lixiviation du nitrate vers les eaux souterraines. Pour ce faire, ils élaborent des conseils techniques sur la base de connaissances souvent acquises à l'échelle régionale. Ils ne disposent pas d'outils appropriés leur permettant, dans un contexte agro-pédo-climatique local, de hiérarchiser les changements de pratiques agricoles à mettre en œuvre. Ils ne peuvent pas non plus estimer l'impact de ces changements sur la teneur en nitrate de l'eau de recharge des nappes, c'est à dire l'eau qui s'infiltre à la base du profil de sol, dans la zone infra-racinaire.
Nous faisons l'hypothèse que les modèles biophysiques de simulation des bilans en eau et azote pourraient être des outils pertinents d'aide à la gestion environnementale des opérations collectives de conseil.

A l'aide de données d'observation enregistrées sur divers sites d'études (sites à bougies poreuses, cases lysimétriques, bassin d'alimentation), nous avons ainsi évalué les propriétés de deux modèles mathématiques basés sur des formalismes différents, le modèle agronomique STICS 4.0 (Brisson et al, 1998) et le modèle environnemental AgriFlux 2.0 (Banton et al., 1996).
En plus de leur utilité, nous tentons également d'évaluer l'utilisabilité de ces modèles issus de la recherche en agronomie ou environnement pour des utilisateurs potentiels non-spécialistes des modèles et disposant de temps d'acquisition de données de terrain et de formation relativement courts.

Sites d'étude et méthodes de travail

Le Haut-Saintois (situé à 50 km au S. de Nancy) comprend deux plateaux calcaires qui hébergent plusieurs nappes libres captées pour l'alimentation en eau potable (AEP) des communes environnantes.

L'opération FERTI-MIEUX du Haut-Saintois a été lancée en 1992 avec l'objectif de restaurer la qualité d'eaux, dont les teneurs en nitrate étaient supérieures à la norme de potabilité de 50 mg/L, sans limiter pour autant l'activité agricole. En conséquence les animateurs de l'opération ont aidé près de 40 éleveurs à changer les pratiques de fertilisation organique qui étaient en cause. Ces changements se sont traduits par la mise en œuvre du compostage collectif des fumiers, la réduction des tonnages épandus et de la fréquence des apports, en

particulier sur maïs, et enfin par la mise en place de cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN).
L'adoption par les éleveurs de ces nouvelles pratiques (appelées ici « pratiques FERTI-MIEUX ») a permis globalement de baisser les teneurs en nitrates de 25 % dans les nappes du Haut-Saintois. Ce site est donc un véritable laboratoire où nous disposons de l'enregistrement de données agronomiques et environnementales depuis plus de 12 ans.

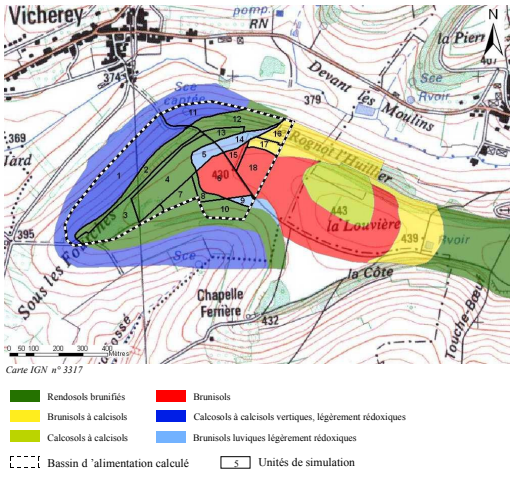


Figure 1
Représentation cartographique du bassin d'alimentation du captage « Rognot l'Huillier », des types de sol et des unités de simulation (les unités agro-

Nos sites d'étude comprennent, sur un de ces plateaux, deux parcelles instrumentées de bougies poreuses mises en place par l'INRA et un bassin d'alimentation de 30 ha alimentant une source captée (fig.1). L'occupation du sol de ce bassin est composée à 10 % de surface boisée, à 39 % de TL et à 51 % de STH.

A partir des données expérimentales des sites à bougies poreuses, nous avons au préalable testé le modèle STICS après une paramétrisation optimale à l'échelle de la parcelle. Nous ne présentons ici que les résultats du test à l'échelle du bassin d'alimentation. Nous avons en effet testé l'aptitude de STICS à simuler divers scénarios agricoles portant sur des changements d'occupation du sol et/ou de pratiques agricoles (tabl. 1).

Résultats

Nous comparons l'impact des pratiques FERTI-MIEUX et de quatre scénarios agricoles sur la teneur en nitrate de l'eau de recharge de la nappe. La simulation des pratiques FERTI-MIEUX a été réalisée à partir de notre connaissance des successions culturales et des séquences techniques mises en œuvre par les agriculteurs exploitant ce petit bassin.
Sans la mise en place des pratiques FERTI-MIEUX (scénario 1), autrement dit en reconduisant les pratiques observées avant 1992, les teneurs en nitrate de l'eau de recharge de la nappe demeureraient à un niveau élevé (+ 83 % en moyenne), incompatible in fine avec la production d'une eau de qualité.
Les scénarios 2 et 3 n'auraient qu'un impact environnemental légèrement supérieur à celui des pratiques FERTI-MIEUX puisqu'ils induiraient une diminution moyenne des teneurs en nitrate respectivement de 8 % et 7 % seulement. Il faut peut-être voir là le fait que le

scénario 2 est relativement proche des pratiques FERTI-MIEUX qui sont déjà très contraignantes en ce qui concerne la gestion de la matière organique avec un conseil de 15 T/ha/3ans de fumier composté. Les CIPAN sont présentes dans les pratiques FERTI-MIEUX mais seulement entre culture d'hiver et de printemps. Dans le cas du scénario 3, nous avons ajouté à cela des CIPAN entre deux cultures de printemps (RGA entre deux maïs). Il n'est donc pas exclu que l'impact environnemental faible de ce scénario soit dû à une mauvaise paramétrisation pour cette succession culturale qui n'a pu être validée à l'échelle de la parcelle.
Le scénario 4 permettrait de diminuer les teneurs en nitrate de manière importante par rapport aux pratiques FERTI-MIEUX (-52 % en moyenne), mais nécessiterait une évolution profonde des systèmes d'exploitation du Haut-Saintois incompatible avec une opération de conseil basée sur le volontariat et sans incitations financières.

		FERTI-MIEUX	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 5a
1992	[NO_3^-] en mg/L	118	139	111	112	57
	Δ en %		*+18*	*-5*	*-5*	*-52*
1993	[NO_3^-] en mg/L	72	89	66	67	37
	Δ en %		*+23*	*-9*	*-7*	*-49*
1994	[NO_3^-] en mg/L	132	142	130	112	56
	Δ en %		*+8*	*-1*	*-15*	*-58*
1995	[NO_3^-] en mg/L	61	89	60	53	29
	Δ en %		*+45*	*-3*	*-14*	*-53*
1996	[NO_3^-] en mg/L	90	145	84	79	43
	Δ en %		*+60*	*-6*	*-13*	*-52*
1997	[NO_3^-] en mg/L	53	95	53	51	37
	Δ en %		*+78*	*-1*	*-4*	*-30*
1998	[NO_3^-] en mg/L	53	131	45	52	25
	Δ en %		*+146*	*-15*	*-3*	*-54*
1999	[NO_3^-] en mg/L	51	119	47	50	24
	Δ en %		*+136*	*-6*	*-1*	*-52*
2000	[NO_3^-] en mg/L	65	129	58	61	30
	Δ en %		*+99*	*-10*	*-6*	*-54*
2001	[NO_3^-] en mg/L	50	127	44	48	22
	Δ en %		*+151*	*-13*	*-5*	*-57*
2002	[NO_3^-] en mg/L	50	121	42	46	27
	Δ en %		*+143*	*-16*	*-7*	*-47*
2003	[NO_3^-] en mg/L	79	145	68	75	22
	Δ en %		*+82*	*-14*	*-6*	*-72*

Tableau 1
Comparaison de 1992 à 2003 des teneurs en nitrates de l'eau de recharge de la nappe simulées sur la base des pratiques FERTI-MIEUX avec les teneurs en nitrate correspondant à 4 scénarios agricoles :

- scénario 1 : pas de mise en œuvre des pratiques FERTI-MIEUX
- scénario 2 : DUP avec interdiction des apports de matière organique
- scénario 3 : mise en œuvre des pratiques FERTI-MIEUX + CIPAN systématiques
- scénario 4: remise en herbe du bassin d'alimentation (mélange graminées-légumineuses sans fertilisation azotée)

Les simulations réalisées à partir des pratiques enregistrées sur ce site et des scénarios agricoles confirment l'intérêt environnemental de l'opération du Haut-Saintois. Précisons, en outre, que son intérêt agronomique est reconnu car les pratiques adoptées n'ont pas conduit à des baisses de rendement donc à des pertes économiques pour les agriculteurs.

Conclusion

Cette première approche du modèle STICS pour des simulations à l'échelle d'un petit bassin d'alimentation présente des perspectives intéressantes. Ce travail n'est pas finalisé mais permet déjà d'entrevoir l'intérêt que représenterait l'utilisation d'un modèle biophysique comme aide au pilotage des opérations agro-environnementales, en particulier au sein de sites où l'absence de dispositifs expérimentaux ne permet pas d'appréhender finement l'impact environnemental de projets de changements de pratiques.

Il existe cependant un certain nombre de limites extrinsèques aux modèles, liées aux contraintes des animateurs de ces opérations. Ainsi, sur la base d'un cahier des charges élaboré après entretien avec des acteurs de terrain et prise en compte de leurs attentes et contraintes, nous avons développé une interface homme-machine simplifiée et régionalisée (STICS-Lor) qui représente une première étape pour envisager le transfert de cet outil d'ingénierie agro-environnementale.

Références bibliographiques

Banton O., Larocque M., Surateau F., Villeneuve J.P., 1993. AgriFlux : logiciel d'évaluation des pertes environnementales de contaminants agricoles. Manuel d'usager. Rapport scientifique INRS-Eau n° R-380. Sainte-Foy, Québec.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, 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 parametrization applied to wheat and corn. Agronomie, 18, 311-346.

Ces travaux ont été réalisés grâce aux données expérimentales acquises par Damien FOISSY, Gilles ROUYER et Lionel CAUDY de la Station INRA-SAD de Mirecourt.

7. Les projets

Animateur : M. Guerif

Moultipass : un Outil Informatique pour gérer et organiser les données d'un modèle de fonctionnement dans un contexte de simulations multiples.

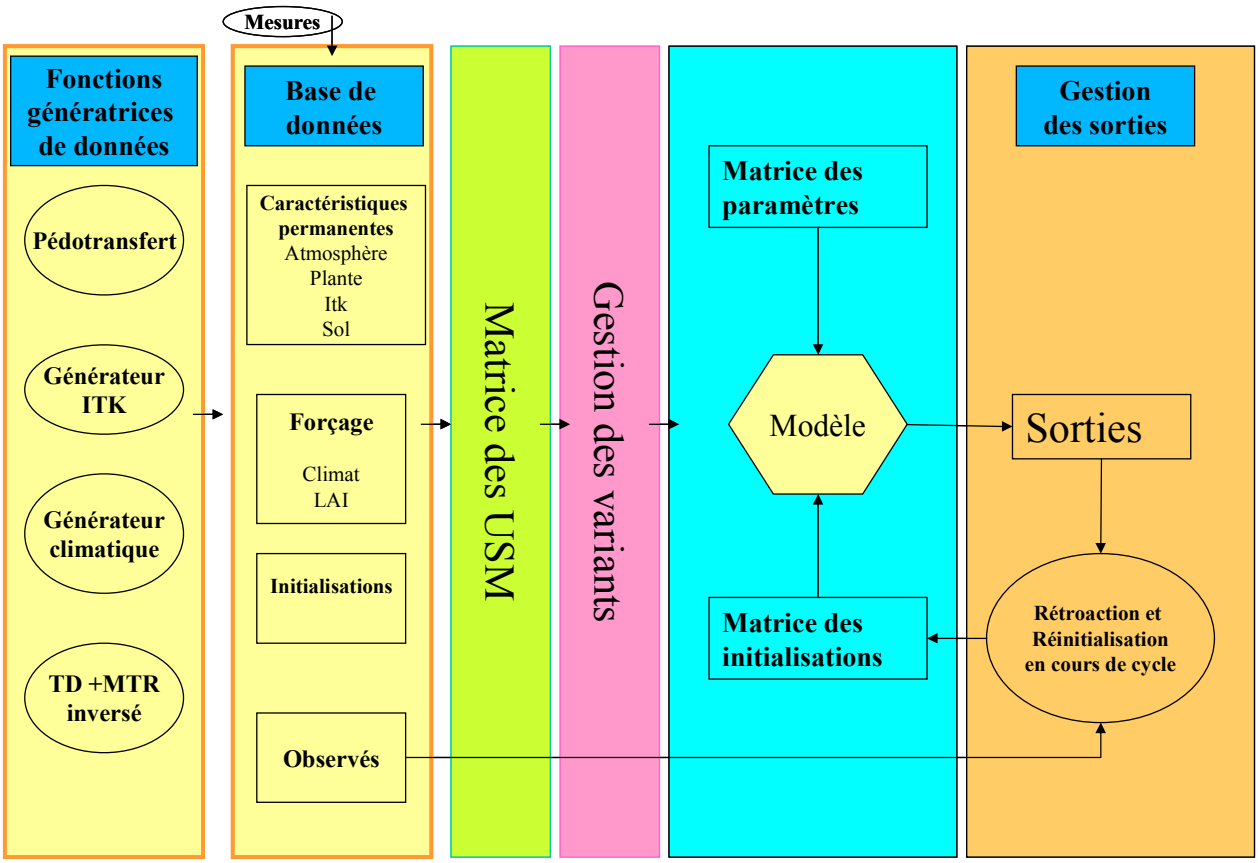
P. Clastre*, N. Brisson, F. Ruget, M. Launay, M. Guérif, D. Ripoche.
INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
**Courriel de l'auteur: clastre@avignon.inra.fr*

Introduction

Au sein de l'unité Climat Sol et Environnement d'Avignon, l'utilisation de modèles de fonctionnement comme le modèle STICS est de plus en plus fréquente et nécessite régulièrement d'itérer le modèle pour répondre à des questions de natures variées: analyse de sensibilité, spatialisation, tests de paramètres, … Par ailleurs, les mêmes fichiers de données d'entrée nécessaires au modèle sont parfois dupliqués sur de multiples postes de travail; ou alors, des fichiers qui pourraient être utilisés dans des projets et des contextes analogues à ceux pour lesquels ils ont été établis ne sont pas mutualisés. Le présent projet est destiné à répondre au besoin des utilisateurs du modèle, en leur proposant un support logiciel qui prendra en charge l'organisation et la mise en commun des données, l'enchaînement des simulations et la gestion des résultats.

Fonctionnalités générales

Le schéma ci-après présente un diagramme des grands groupes fonctionnels de Moultipass. Il illustre les besoins exprimés par les utilisateurs et la forme de la solution technique envisagée, en parcourant, de la gauche vers la droite, les différents processus de gestion des données au cours de l'utilisation de Moultipass.



Le principe est que l'utilisateur construit un jeu de données d'entrée du modèle en les sélectionnant dans une banque de données, soit à partir de données déjà formatées pour le modèle, soit à partir d'autres données et de fonctions génératrices associées (ex : cartes pédologiques et fonctions de pédotransfert associées, images de télédétection et modèle de transfert radiatif inverse associé,…). Un système d'information devra gérer l'ensemble des fichiers d'entrée du modèle, décrits par des informations qualitatives (méta données) qui permettront au système de réaliser la recherche et la sélection sur des critères objectifs. Les méta données qualifient la donnée, aussi bien sa situation géographique, que sa qualification agronomique (conditions climatiques particulières, par exemple, très chaud, très sec, stress hydrique très modéré), sa qualité (mesures agronomiques, précision des données d'entrée, ..). Un mécanisme de validation permettra de référencer les nouveaux fichiers dans ce système d'information. L'objectif est de permettre à plusieurs utilisateurs de partager les mêmes données source.
Moultipass proposera plusieurs règles d'associations destinées à combler les données manquantes par des valeurs prises dans la base, soit par des règles préétablies, soit par des règles que peut fabriquer l'utilisateur en utilisant des proximités géographiques (distances, position par rapport à un relief,…),ou logiques. En fonction de la requête ou de la prescription de l'utilisateur, l'outil Moultipass créera alors une matrice qui recense tous les cas de simulation possibles obtenus à partir du croisement des données d'entrée et l'intégration éventuelle de conditions de variations sur certains paramètres. Le modèle sera ensuite appelé pour chaque cas de simulation.

L'outil assurera la traçabilité des actions de l'utilisateur au niveau de la sélection des données (pour réutilisation ultérieure [autre utilisateur, changement d'une information …]) et au niveau des règles d'associations appliquées.

Certaines des variables nécessaires peuvent être fournies sous forme de données géoréférencées. Moultipass devra donc être capable d'assimiler une (ou plusieurs) donnée cartographique et de générer les appels au modèle correspondants pour chaque élément de cette donnée en le combinant aux autres informations. Une information géographique de localisation est également associée aux fichiers d'entrée pour caractériser l'extension spatiale ou le domaine de validité.

Le support d'exécution prendra en charge d'éventuelles boucles de rétroaction qui agiront sur le fonctionnement du modèle via des fichiers d'initialisation actualisés en cours de cycle.

Au niveau des sorties, Moultipass devra intégrer des fonctions d'analyse statistiques, et de représentation cartographique.

Le projet informatique
Le processus de développement envisagé comportera les principales étapes suivantes :

- Rédaction et validation du cahier des charges
- Réalisation maquette
- Etat de l'art et interaction avec les autres projets existants (plate forme modélisation, BAO modélisation …)
- Découpage en objectifs restreints
- Réalisation prototype 1 (cycle de développement en spirale, avec accroissement des fonctionnalités, défini par un comité de pilotage)

Le planning de réalisation date les différentes étapes. Le terme COPIL correspond à des réunions d'un comité de pilotage, chargé des arbitrages des priorités de développement.

2nd tri 2005	**3ième tri 2005**	**4ième tri 2005**	**1er tri 2006**	**2nd tri 2006**
Etude faisabilité Maquette 1 COPIL 1	Maquette définitive Validation CdC COPIL 2	Validation analyse COPIL 3 (arbitrages priorités)	Développement (stagiaires, CDD)	Développement, prototype v1

Conclusion

Dans un premier temps, Moultipass est destiné à fonctionner avec le modèle STICS. A terme, l'analyse devra permettre l'intégration d'autres modèles de fonctionnement du système Sol-Plante-Atmosphère utilisés dans l'unité.

La possibilité de diffusion de cet outil n'est pas écartée, mais l'impact technologique de ce choix n'est pas négligeable et nous conduit, dans un souci d'aboutir le plus rapidement possible à un logiciel opérationnel, à différer cet aspect de l'étude. Une maquette devrait être validée pour la fin du troisième trimestre 2006.

Références

Baret F., Tchamitchian M., Sohbi Y., 1996, In Actes de l'école-chercheurs INRA en bioclimatologie, Le Croisic, 25-29 Mars 1996, 305-318.
Delécolle R., Loubet B., Tchamitchian M., 1996, In Actes de l'école-chercheurs INRA en bioclimatologie, Le Croisic, 25-29 Mars 1996,285-303.
Ruget F., Brisson N., Delécolle R., Faivre R., 2002.. Agronomie, 22, 133-158.
Houlès V, Mary B, Guérif M, Makowski D, Justes, 2004. Agronomie 24 (6-7): 339-349
Juin S, Brisson N, Clastre P, Grand P, 2004. Agronomie 24 (6-7): 327-337

Couplage de STICS avec un modèle de structure pour l'assimilation des Images de télédetection.

F. Baret
INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
**Corresponding author email:* baret@avignon.inra.fr

L'assimilation d'observations pour améliorer les simulations de STICS

Les modèles de fonctionnement du couvert tels que STICS (Brisson et al., 2003) sont des outils bien adaptés pour établir des pronostics, ou simuler des scénarios permettant de comparer différentes stratégies culturales vis-à-vis des conséquences sur la production en qualité et quantité, sur l'environnement, et bien sur, sur le résultat économique. Toutefois, le modèle comporte de nombreux paramètres et variables décrivant les conditions initiales. Ces paramètres et variables ne sont pas toujours connus avec grande précision. De plus, la modélisation comporte elle-même des limitations liées au formalisme utilisé et à la description adoptée pour les différents processus et leur interaction. Ces sources d'incertitudes engendrent des écarts entre les simulations du modèle et la réalité. En particulier, différents travaux montrent la difficulté de la représentation de la variabilité spatiale qui pourtant est essentielle, notamment pour des applications de type agriculture de précision. Dans ce cas, la variabilité liée au sol (profondeur, type, structure de surface…) est dominante, et les caractéristiques du sol renseignées de manière imprécise. Il est donc nécessaire de développer des techniques permettant de réduire ces écarts.

L'assimilation d'observations dans les modèles, maintenant utilisée de manière opérationnelle dans les domaines de la météorologie et de l'océanographie, devrait permettre d'améliorer les simulations du modèle en exploitant les observations réalisées sur la culture (Moulin et al., 1998). L'assimilation peut en effet se définir comme l'art d'associer des mesures à des modèles. La technique autorise l'assimilation de toute sorte de mesures, si tant est que les variables associées sont bien simulées par le modèle. Des mesures réalisées sur de larges domaines d'espace offrent de plus la possibilité de prendre en compte la variabilité spatiale des cultures, et permet d'accéder éventuellement à la variabilité des propriétés des sols.

La télédétection : une source unique d'observations spatialisées et répétitives

La télédétection portée (sur tracteur, drone, ballon, avion…) ou spatiale (satellite) offre la possibilité de couvrir des espaces relativement larges et éventuellement de répéter les mesures le long du cycle de développement des cultures. Dans le domaine solaire, les principales variables d'état accessibles sont l'indice foliaire (LAI) et le contenu en chlorophylle des feuilles (Cab) ou du couvert (LAI.Cab), voire le contenu en eau du couvert (LAI.Cw) (Weiss et al., 2000). Des modèles physiques de transfert radiatif permettent de simuler la radiance enregistrée au niveau du capteur à partir des variables décrivant la structure (dont le LAI) et les propriétés optiques des feuilles (dont Cab et Cw). Les modèles de fonctionnement tels que STICS simulent le LAI qui est utilisé par un certain nombre de processus. Ils peuvent, moyennant certaines adaptations, simuler également les variables Cab et Cw. Ces variables représentent dont le lien entre modèles de fonctionnement du couvert et observation de télédétection. Elles doivent donc pouvoir être assimilées.

L'assimilation des observations de télédétection nécessite une bonne description de la dynamique de la structure du couvert.
Le modèle STICS simule la dynamique de l'indice foliaire avec une précision suffisante pour les processus mis en œuvre en son sein, notamment pour la photosynthèse et l'évapotranspiration. Toutefois, certains travaux montrent que cette précision s'avère insuffisante pour l'exploitation des observations de télédétection, rendant l'assimilation hasardeuse (Baret and Weiss, 2003). En effet, la radiance enregistrée par le capteur et simulée par le modèle de transfert radiatif, est très sensible aux variables LAI, Cab et Cw. Elle est également sensible aux hypothèses faites sur la structure, en particulier concernant l'agrégation des feuilles. Réciproquement, l'estimation de ces variables par inversion des modèles de transfert radiatif est donc aussi très sensible aux hypothèses sur la structure formulées dans les modèles de transfert radiatif. Pour exploiter au mieux les observations de télédétection au travers de l'approche assimilation, il faudra donc décrire la dynamique de la structure du couvert de manière réaliste. Il faut donc coupler au modèle STICS un module de description dynamique de la structure tridimensionnelle (3D + temps = 4D), capable de représenter avec un réalisme suffisant le transfert radiatif à tous les stades de développement du couvert.

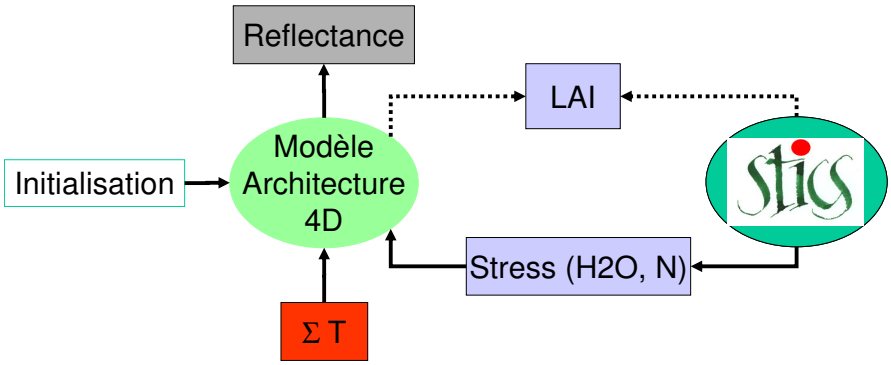


Figure 1. Schéma montrant comment un modèle d'architecture 4D pourrait être couplé au modèle STICS.

Une proposition de couplage
Différentes manières sont envisageables pour le couplage de modèles de fonctionnement et de structure. Il serait sans doute possible d'obtenir une description mécaniste du développement de la structure des plantes intégrant un fonctionnement 'distribué' prenant explicitement en compte la topologie de chaque organe et ses conséquences en terme de micro-climat local (température, rayonnement, …) et de rapport avec les autres organes (relations source-puits, …). C'est ce qu'à tenter de faire (Hongping et al., 2002) avec le modèle GreenLab. Cette approche, bien que séduisante du point de vue académique, est sans doute d'un ordre de complexité supérieur et dans un état de maturité non encore abouti. C'est la raison pour laquelle nous proposons une approche plus simple, basée sur le couplage entre le modèle STICS et un modèle 4D de structure dynamique du couvert (Figure 1). Le modèle 4D de structure (4DS) fournit une description suffisamment précise pour le calcul du transfert radiatif. En entrée, il nécessite le temps phénologique sous la forme classique de somme de températures. Dans le cas relativement simple du mais, l'apparition des feuilles est déterminée par le phylloterme et le nombre de feuilles maximum est fixé par la variété considérée. En absence de stress, la surface relative de chacune des feuilles est fixée, ainsi que leur durée de vie. Dans le cas où des stress interviennent (hydrique, azoté, …) ces stress vont agir en diminuant la surface potentielle des feuilles non encore apparues, et aussi raccourcir la durée de vie des feuilles. L'intensité des stress est fournie par le modèle STICS. En retour, le

modèle STICS peut utiliser la valeur d'indice foliaire simulée par le modèle 4DS, bien que cette possibilité ne soit pas obligatoire.

Conclusion

De futures missions spatiales sont programmées qui vont associer à la fois une haute résolution spatiale et une haute répétitivité temporelle. L'utilisation de ces futures observations en agriculture ou pour l'environnement nécessite de développer de nouveaux outils. L'assimilation de ces observations dans un modèle couplé de transfert radiatif et 'structure-fonction' constitue une réponse pertinente à cette demande. Nous proposons une approche relativement proche basée sur un modèle de structure dynamique 4D de la culture. La surface foliaire est modulée par les stress tels qu'ils sont calculés par STICS. Cette approche n'en est encore qu'au stade conceptuel, et il faudra bien sur définir, par grands types de culture les lois d'action des stress sur la réduction de la surface foliaire et la durée de vie des feuilles. Il faudra également s'intéresser au contenu en chlorophylle, et tenter de le relier de manière robuste à la dynamique de l'azote dans la plante telle qu'elle peut être représentée dans le modèle STICS. Ces questions doivent faire l'objet d'une part significative des travaux réalisés à l'INRA d'Avignon pour les prochaines années.

References

Baret, F. and Weiss, A., 2003. Assimilation of multi temporal- spectral-directional reflectance data in a NPP model: case study LAI, chlorophyll and water contents assimilation; comparison between SPECTRA and simpler sensor performances. ESA Contract 13176/98/NL.GD, INRA-CSE, Avignon.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B. and Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy, 18: 309-332.

Hongping, Y., de Reffye, P., Bao-Gang, H. and Mengzhen, K., 2002. Fast construction of plant architectural models based on substructure decomposition., SAC 2002 (Spain), Spain.

Moulin, S., Bondeau, A. and Delecolle, R., 1998. Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. International Journal of Remote Sensing, 19(6): 1021-1036.

Weiss, M., Baret, F., Myneni, R., Pragnère, A. and Knyazikhin, Y., 2000. Investigation of a model inversion technique for the estimation of crop charcteristics from spectral and directional reflectance data. Agronomie, 20: 3-22.

Projet RECORD : REnovation et COoRDination de la modélisation des cultures

D. Wallach

INRA UMR ARCHE, B.P. 27, 31326 Castanet Tolosan Cedex
**Contact: wallach@toulouse.inra.fr*

OBJECTIF

L'objectif du projet RECORD est de développer une nouvelle génération de plate-forme pour modèles de culture (MdC) basée sur STICS. (On parle de plate-forme parce qu'il ne s'agit pas d'un seul modèle mais d'un logiciel avec des modèles pour plusieurs cultures, qui partagent un certain nombre de modules.)

CONTEXTE

Dans le département EA, un certain nombre de conditions sont maintenant réunies permettant une réflexion renouvelée sur une plate-forme pour MdC. D'abord, une version initiale de ce projet a été approuvée par le chef du département et présentée au collège de direction et au conseil scientifique de l'INRA. Ensuite, STICS a atteint une certaine maturité, ce qui permet de tirer un certain nombre de leçons sur des évolutions souhaitables. Enfin, d'autres acteurs de la modélisation du département (et même en dehors) pourraient être mobilisés pour contribuer à cette réflexion.

CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges doit être défini par l'ensemble de la communauté des modélisateurs et utilisateurs des modèles du département. Rédiger ce cahier des charges sera la première activité du projet. Il ne s'agit pas de faire un cahier des charges ex nihilo mais plutôt de prendre STICS comme point de départ, en profitant également des autres expériences en modélisation du département et ailleurs. La liste ci-dessus n'est donc qu'une proposition de sujets à traiter dans le cahier des charges.

Qualité prédictive des modèles

L'utilité d'un modèle est très fortement liée à sa qualité et en particulier à sa capacité de prédiction. Mieux connaître et améliorer cette qualité est probablement l'aspect le plus important et le plus difficile du projet. Trois pistes peuvent déjà être évoquées.

Modules qui peuvent être évalués séparément

La première piste concerne le statut des modules de la plate-forme. Un modèle global est une collection d'un certain nombre de modules. Chaque module a des entrées - variables d'état et/ou variables explicatives - et des sorties - une ou plusieurs variables d'état. Par exemple, on pourrait définir un module qui calcule l'augmentation journalière potentielle en biomasse, en absence de stress azoté ou hydrique. Les entrées pourraient comprendre le rayonnement intercepté et la température moyenne du jour et la sortie serait l'augmentation de la biomasse. Un autre module pourrait calculer le rayonnement intercepté, avec comme variables d'entrée le rayonnement incident et LAI.
Il serait très avantageux que pour chaque module, toutes les entrées et toutes les sorties soient mesurables expérimentalement. Chaque module pourrait alors être paramétré et testé séparément des autres, à partir des mesures sur ses entrées et ses sorties. C'est déjà le cas pour

certains modules pour les modèles existants. La proposition ici est de pousser cette logique plus loin. Parmi les avantages d'une telle approche :
1.L'amélioration du modèle passerait par l'amélioration de chaque module. Les paramètres ne seraient pas estimés pour assurer des compensations d'erreurs entre un module et un autre, mais pour améliorer la qualité de prédiction de chaque module. Du coup, la contribution de l'expérimentation au modèle deviendrait plus directe. Si des expériences suggéraient une amélioration pour un module, on pourrait profiter de ces résultats en remplaçant le module par une version plus conforme aux données. Ce n'est pas le cas quand le modèle est basé sur des compensations d'erreur. En ce cas, améliorer un module peut dégrader l'ensemble.
2. L'interaction entre expérimentation sur des processus et modélisation deviendrait plus étroite. Les possibilités d'expérimentation détermineraient la définition des modules, étant donné que l'on exige qu'il soit possible de mesurer toutes les entrées et toutes les sorties de chaque module. Cela pourrait permettre par ailleurs de justifier des moyens d'expérimentation sophistiqués et lourds dans le contexte de MdC.
3. Les paramètres auraient alors un sens clair, déterminé par leur rôle dans le module. Ils ne seraient pas simplement des valeurs qui compensent des erreurs. Par exemple, cela permettrait de comparer des valeurs pour un même paramètre dans des conditions différentes.
4. Tester un modèle de culture se ferait alors en deux parties. On testerait d'abord les modules individuels, puis le modèle global. En ajoutant la possibilité de tester au niveau des modules individuels, on augmenterait très sensiblement l'exhaustivité des tests.
5. L'indépendance des modules pourrait permettre une décentralisation des responsabilités, différentes personnes étant responsables de différents modules.
Même s'il n'est pas possible de définir tous les modules de façon à ce que, pour chacun, on puisse mesurer toutes les entrées et toutes les sorties, il pourrait être intéressant de pouvoir le faire pour un nombre important de modules. Ceux-là pourraient alors être traités de façon indépendante.
La construction d'un modèle à partir de modules indépendants pose non seulement des problèmes de physiologie (représentation des processus) et d'expérimentation (comment mesurer entrées et sorties) mais également des questions statistiques. Faut-il ajouter au modèle global quelques paramètres qui sont explicitement des paramètres de calage pour le système global ? Est-ce qu'il y a toujours intérêt à découper le modèle le plus finement possible ?

Documenter la qualité

Chacun utilise un modèle de culture pour un nombre limité de situations. Par contre, pour connaître la qualité de prédiction d'un modèle de culture, il est important d'avoir beaucoup d'expérience avec le modèle. Cela suggère qu'il serait important de a) faire en sorte que, le plus possible, différents utilisateurs utilisent le même modèle (mêmes équations, mêmes valeurs des paramètres), et b) mettre en place un système de documentation permettant de garder la trace des utilisations et la performance du modèle dans chaque cas.

Utilisation de méthodes mathématiques et statistiques

Un regard sur les équations du modèle d'un point de vue mathématique permettrait d'éviter certaines caractéristiques qui peuvent poser problème. En particulier, il est important que les variables calculées soient des fonctions continues des paramètres et des variables explicatives. Il faut par ailleurs éviter des paramètres non-identifiables.
Le couplage de la plate-forme avec des algorithmes d'analyse de sensibilité, d'évaluation ou d'estimation des paramètres permettrait de mieux analyser et comprendre le comportement du modèle.

Utilisations de la plate-forme

On peut distinguer deux grandes classes d'utilisation de la plate-forme. D'abord, elle pourrait être utilisée pour étudier des systèmes de culture, soit par des chercheurs du département EA soit par d'autres acteurs, en partenariat avec EA ou non. Il faudrait faire une liste de ces utilisations prévues ou prévisibles et les implications dans chaque cas pour la plate-forme. Dans certains cas, ces implications peuvent concerner les équations du modèle. Par exemple, si on veut étudier l'effet du travail du sol, il faudrait que le modèle décrive les interactions entre la structure du sol et les autres processus. Dans d'autres cas, une utilisation peut nécessiter une structure informatique particulière. Par exemple, si on veut coupler un modèle de culture avec un modèle décisionnel, il faudrait que les deux interagissent chaque jour de la simulation, ce qui est incompatible avec une structure informatique qui fait une année de simulation d'un seul trait. Il faudrait par ailleurs identifier par qui et pour qui la plate-forme sera utilisée, et lesquels de ces acteurs devraient être associés à la rédaction du cahier des charges. Certainement les instituts techniques seraient intéressés par une telle plate-forme. D'autres départements de l'INRA (PHASE, SPE, SAE2) pourraient également être intéressés. La deuxième grande classe d'utilisation est celle où la plate-forme est utilisée comme outil de recherche. Dans ce cas, un chercheur concerné par un ou par quelques processus pourrait vouloir intégrer sa modélisation de ces processus dans un modèle global. Le modèle global servirait à fournir des variables d'entrée pour les processus étudiés ou permettrait d'évaluer les conséquences de ces processus au niveau du système global. Pour permettre cette utilisation, il faudrait pouvoir remplacer des modules standard de la plate-forme par des modules du chercheur.

Bases de données

Chacun a besoin des données d'entrée pour faire des simulations. Les plus communes sont les données météo et données sol. Il y aurait évidemment un avantage important à mutualiser ces données et à les rendre disponibles à tout utilisateur de la plate-forme.

Informatique

La structure informatique d'une plate-forme pour MdC est évidemment essentielle. Il faudrait que cette structure assure une grande flexibilité, transparence et facilité d'évolution. Il faudrait qu'elle permette le remplacement de certains modules par d'autres et qu'elle permette le couplage entre la plate-forme et d'autres modèles.

Gouvernance

Il ne suffit pas de créer une plate-forme puis de la livrer à des utilisateurs. Il faut que la plate-forme évolue et pour cela il faut prévoir des mécanismes d'évaluation et de modification. Cela peut concerner aussi bien des aspects informatiques que scientifiques. Un groupe de modélisateurs et d'utilisateurs doit être chargé de la prise en charge de cette évolution. A l'intérieur de ce groupe, certaines personnes pourraient avoir une responsabilité pour un aspect particulier du modèle.

Bibliographie

Il faudrait étudier les autres plates-formes pour MdC ou similaires, en France ou à l'étranger, pour profiter de leurs expériences.

Projet de simulation du fonctionnement des prairies naturelles herbacées basée sur la caractérisation fonctionnelle de la biodiversité prairiale

Françoise Ruget, Nadine Brisson, Michel Duru et Pablo Cruz
INRA Climat, Sol et Environnement, Domaine Saint Paul 84914 AVIGNON cedex 9
etOrphée, UMR ARCHE, Chemin de Borde Rouge 31326 CASTANET TOLOSAN

Introduction

L'estimation de la production des prairies est un enjeu majeur de la gestion de l'alimentation des troupeaux. Or, l'estimation mathématique de la production fourragère est souvent la seule méthode disponible à cause de l'utilisation directe des fourrages. Cela explique le succès du système opérationnel ISOP (RUGET et al., 2001) qui fournit des estimations mensuelles de production fourragère régionale sur la base du modèle de culture STICS (BRISSON et al., 1998), paramétré pour une graminée fourragère "moyenne", alimenté par une base de données pédologiques, climatiques et techniques régionalisées et prenant en compte divers modes de conduite pour des prairies de fauche (défoliation complète).

Mais la plupart des prairies françaises (74 % au recensement agricole de 2000) sont des prairies permanentes, naturelles ou semi-naturelles, en raison de l'impossibilité ou des difficultés de mécanisation. Du fait qu'elles sont permanentes, leur composition botanique évolue vers un équilibre entre espèces qui dépend à la fois du milieu physique (température, sécheresse, engorgement,..) et des pratiques agricoles, en particulier de l'intensification (fertilisation, charge et rythme d'exploitation, DURU et al., 1998). Elles sont donc particulières à deux titres : leur situation dans des milieux défavorisés : altitude, zones humides ou inondables, zones très sèches et leur diversité floristique.
En marge de ces préoccupations agricoles, les prairies naturelles correspondent à des couverts végétaux herbacés faiblement anthropisés et leur capacité de production est une bonne estimation des potentialités intrinsèques d'un milieu pédoclimatique.
La multifonctionnnalité de l'agriculture comprend la préservation de la biodiversité des milieux. Or comprendre le fonctionnement des communautés prairiales en interaction avec les actions, mêmes limitées, de l'agriculteur (coupe, pâturage,…) est un élément de diagnostic pouvant entrer dans un processus décisionnel. En complément, les préoccupations environnementales et sociétales actuelles peuvent conduire à une extensification de certaines agricultures régionales que nos modèles peuvent aider à raisonner (optimisation multicritères des techniques agricoles). A ces fins, le caractère systémique et dynamique de l'approche par modèle de culture, en accord avec la notion d'écosystème, permet d'identifier les multiples composantes de la valeur d'usage des prairies : vitesse de croissance, quantité maximale de biomasse accumulée et valeur nutritive de cette biomasse, structure du couvert…

L'objectif du projet de thèse est d'introduire l'approche fonctionnelle des communautés végétales complexes dans le modèle STICS, car cette approche donne accès à des éléments de compréhension de leur évolution des prairies sous les impacts combinés du milieu physique et humain : indices de stress, interception du rayonnement, réserves hivernales, potentiel de minéralisation…, qui peuvent être pris en compte dans le modèle.

Objectifs et méthodes

Le projet se situe dans le cadre des programmes de modélisation agrophysiologique de l'équipe FEATD (modèle STICS) et dans le prolongement des travaux sur la prairie de F. Ruget. Il est positionné dans un objectif d'extension des aptitudes du modèle. Actuellement le

modèle « prairie » de STICS se limite à des couverts de graminées standard productives. Le projet se propose, en cohérence avec les approches proposées par Michel DURU et son équipe (BALENT, 1991 ; DURU et al., 1998), d'introduire dans STICS la prise en compte de la biodiversité des prairies et de la variété de leurs modes d'exploitation, en particulier les spécificités du pâturage.
L'approche des agro-écologues consiste en une lecture simplifiée et fonctionnelle de la végétation, qui s'appuie sur une typologie des prairies elle-même bâtie sur le regroupement d'espèces sur la base de types fonctionnels de plantes (LAVOREL et GARNIER, 2002, CRUZ et al., 2002). Un type fonctionnel de plante peut être considéré comme un ensemble d'espèces qui accomplissent une fonction similaire dans l'écosystème, sans forcément présenter de liens phylogénétiques (GITAY et NOBLE, 1997). Les groupes sont caractérisés par une ou plusieurs valeurs communes de traits fonctionnels, définis comme des caractéristiques biologiques des espèces (morphologiques, physiologiques, phénologiques, démographiques, etc.) et traduisant des fonctionnements ou des stratégies. Ainsi, la valeur des traits peut, par exemple, renseigner sur la "préférence" des espèces à des conditions plus au moins fertiles, leur tolérance à des défoliations plus au moins fréquentes, ou alors permettre d'évaluer l'influence de telles espèces sur les caractéristiques agronomiques du couvert (ANSQUER et al., 2004). Ce sont ces notions que l'on veut introduire dans les modèles de cultures jusqu'à présent représentant des couverts monospécifiques, ou éventuellement des cultures associées contenant deux espèces. Cette approche est en phase avec les supports de la généricité introduits dans le modèle STICS. La généricité s'appuie sur des choix de paramètres et de formalismes basés sur des études comparatives en terme d'agrophysiologie (écophysiologie en interaction avec les pratiques). Ainsi le modèle est potentiellement adaptable à de nombreuses cultures (annuelles, pérennes, herbacées, ligneuses, cultures industrielles,…). Actuellement, paramètres et choix de formalismes s'adressent soit à des cultures pures, soit à des cultures associées à deux composantes. Il s'agirait, dans le cadre de ce projet, de transférer ces notions aux groupes fonctionnels prairiaux. Il ne s'agit pas de prédire l'évolution de la biodiversité (domaine de compétence des modèles de biodiversité). Il s'agit de se situer en aval des descriptions des écologues qui font office de «prescripteurs». Mais il n'est pas impossible que STICS puisse fournir des variables de rétroaction aux modèles de biodiversité.

Les limitations du modèle STICS pour simuler les prairies permanentes sont de nature à la fois écophysiologique et agronomique. Une première composante écophysiologique concerne les capacités du modèle à simuler le caractère pérenne du couvert (comportement hivernal, incluant le fonctionnement du sol et des racines (mortalité, …), des mises en réserve et remobilisations, l'état de développement, pour bien restituer le fonctionnement azoté du couvert et du sol même sur plusieurs années. La seconde composante écophysiologique concerne la plurispécificité dont l'analyse par types fonctionnels montre que sa prise en compte est pertinente et indispensable. (VIEGAS et al., 2005). Un des défis majeurs du travail proposé est la mise en adéquation traits fonctionnels - paramètres du modèle. La troisième composante importante est la composante agronomique, elle concerne le mode d'exploitation particulier qu'est la pâturage, qui implique un fonctionnement écophysiologique de la culture assez différent (défoliation partielle et progressive), mais aussi des phénomènes associés, comme les apports de fertilisants par les excréments des animaux.

Le principal objectif du projet est de simuler le fonctionnement des prairies permanentes, c'est-à-dire de chercher à étendre les aptitudes du modèle STICS à des conditions éloignées des conditions optimales généralement étudiées en conditions expérimentales (couverts annuels et monospécifiques, espèces à forte productivité, défoliation totale à la coupe, bonne fertilité du sol). On vise ainsi à s'approcher des conditions de la production fourragère

française non intensive, c'est-à-dire des conditions subies par les prairies permanentes, croissant soit en altitude, soit dans des zones à inondation temporaire ou à engorgement, soit dans des zones où la sécheresse extrême peut entraîner la mortalité d'une partie du couvert ou des reprises particulièrement difficiles et attendues après sécheresse estivale forte. La prise en compte des spécificités des prairies permanentes se décompose donc en plusieurs points : prise en compte de la pérennité, en particulier autour de l'aspect de la fourniture minérale du sol, la plurispécificité et les effets écophysiologiques et environnementaux liés au pâturage.

Sur un plan plus méthodologique, on souhaite analyser le rôle que peut jouer l'approche par modèle dynamique de culture dans l'appréhension de la biodiversité prairiale. L'idée est de chercher à remplacer l'espèce (classique) ou l'espèce moyenne (simulant une graminée intermédiaire entre les graminées cultivées comme dans ISOP) par un cortège d'espèces, tel qu'il est observé dans les prairies permanentes. L'approche envisagée est celle de la typologie fonctionnelle qui permet de synthétiser le comportement du groupe d'espèces dominant au travers des valeurs d'un ensemble de traits fonctionnels, donc pour STICS en un seul jeu de paramètres.

Programme de recherches

Pour aborder le fonctionnement et la conduite particulière des prairies naturelles, les limitations de STICS peuvent être classées en composantes écophysiologiques (pérennité, plurispécificité) et agronomique (pâturage). Il s'agit de :

a. consolider la simulation de la composante « pérenne » des couverts prairiaux par des paramétrages appropriés ou la remise en cause de certains formalismes jugés inadaptés. Les fonctions d'intérêt seront le turn-over racinaire et le bilan d'azote, la vernalisation et la mise en réserve hivernale avec sa remobilisation au printemps.

b. prendre en compte la biodiversité des prairies en simulant des communautés d'espèces

c. prendre en compte des effets liés au pâturage: défoliation, tassement, niveau et type de fertilisation. La défoliation partielle et fréquente est sans doute le principal élément à introduire. S'il est possible actuellement, d'un point de vue purement informatique, de simuler cette défoliation, il faut également en tester les effets secondaires sur la repousse qui ne sont pas forcément bien pris en compte. Un autre aspect concerne la fertilisation de ces prairies. On se trouve, pour les prairies permanentes, dans des conditions où la minéralisation de l'azote du sol, des résidus (renouvellement des racines) et des excréments animaux est la principale source d'azote pour le couvert (37 % des prairies permanentes ne sont pas fertilisées, pour celles qui le sont la moyenne d'apport est 64 kg N/ha (Agreste Primeur, 1998), les INN de début de cycle (indices de nutrition azotée, enquête "Prairies" réalisée par le SCEES en 1998), ont une moyenne française pour les prairies permanentes de 0.6)

Références

Ansquer P., et al., 2004. Fourrages, 2004, 179, 353-368
Balent G., 1991: Options Mediterranéennes, Série A Séminaires 15, 73-81.
Brisson N., et al., 1998. Agronomie, 18, 311-346.
Cruz P., et al., 2002. Fourrages, 172, 335-354.
Duru M., et al., 1998. Fourrages 153:97-113.
Gitay, H., & Noble, I.R. 1997. in Plant Functional Types. Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change, edited by T. M. Smith, H. H. Shugart & F. I. Woodward. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 3-19.
Lavorel S., Garnier E., 2002. Functional Ecology, 16, 545-556.
Ruget F. et al.,, 2001. in Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, Collection Repères, Malézieux, Trébuil, Jaeger ed, ed Cirad-INRA, Montpellier., 263-282.
Viégas J., et al., 2005. Proceedings of the 20th European Grassland Federation (sous presse).

Presentation du projet de plateforme de modélisation des paysageS du programme SEVE : Place des modeles de Culture

A. Chanzy[1], I. Braud[2,3], G. Dedieu[4], A. Olioso[1] et coll[5à15]

1 INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
2 UMR LTHE,Grenoble,
3 UR HHLY, Cemagref, Lyon
4 UMR CESBIO, Toulouse
5 CNRM, Météofrance, Toulouse
6 UR QEPP; Cemagref, Lyon
7 INRA, UR Ephyse, Bordeaux
8UMR LISAH, Montpellier
9 LCPC-eau, Nantes
10 LMC, Grenoble
11 IMFS, Strasbourg
12 ENPC-CEMIC, Marnes la Vallée
13 Laboratoire Jacques-Louis Lions, Paris
14 Laboratoire de mécanique des fluides, ECN, Nantes.
15 INRIA-Rocquencourt, projet Estime, Le Chesnay

**Correspondant:* achanzy@avignon.inra.fr

Introduction

La compréhension du fonctionnement des surfaces continentales aux échelles du paysage et de la région pose de nombreuses questions non résolues. Parmi celles qui ont été assez peu abordées par la communauté, nous citerons la compréhension des interactions des divers processus et l'expression de ces interactions aux diverses échelles de temps et d'espace, l'impact des activités humaines présentes et passées sur ces processus, le rôle de la structuration de l'espace d'origines naturelle ou anthropique. Outre les études de processus et la mise en place de dispositifs de mesure, savoir répondre à ces questions passe par une modélisation intégrée de l'ensemble des processus impliqués dans les cycles de l'eau, du carbone et des autres éléments (y compris d'origine anthropique) au niveau des surfaces continentales, aux échelles du paysage et de la région.
Dans le programme SEVE nous comptons développer un modèle de fonctionnement des surfaces continentales, représentant explicitement les hétérogénéités de surface et permettant de simuler les processus couplés impliqués dans les cycles de l'eau, du carbone, de l'azote et des substances polluantes. Cette modélisation devra reposer sur une plate-forme informatique ouverte afin de pouvoir aisément modifier ou échanger des composantes en fonction d'objectifs spécifiques. Ceci nous a amené à bâtir une architecture modulaire dont les grandes lignes sont présentées par la suite. Le projet est actuellement dans la phase de validation du cahier des charges. Ce projet est porté par une communauté rassemblant actuellement 15 laboratoires provenant de disciplines variées (hydrologie, météorologie, agronomie, écologie) et travaillant sur différentes composantes des surfaces continentales (milieu naturel, milieu cultivé, zone urbaine, atmosphère, rivières …).

Segmentation et topologie du paysage

La segmentation du paysage retenue dans SEVE doit permettre de représenter explicitement l'hétérogénéité des surfaces continentales, ce qui implique un mode de découpage de l'espace capable de prendre en compte :

- les caractéristiques principales de la topographie (pente, orientation des versants),
- du sol (horizons pédologiques, organisation dans le paysage),
- de l'occupation du sol (type et rotation des cultures, habitat, routes),
- des chemins de l'eau (réseau hydrographique naturel ou anthropique),
- des aménagements rencontrés dans les bassins versants (ouvrages, fossés, digues, irrigation, pompage, drainage, etc..).

L'espace est défini en trois compartiments : l'atmosphère, la surface, le sol/sous sol. Dans chacun de ces compartiments, l'espace sera segmenté en objets identifiables dans le paysage (parcelle agricole, parcelle urbaine, horizon pédologique, tronçon de rivière, tronçon de haie …). Ces objets seront associés à des classes définissant les propriétés et les modèles d'évolution de l'objet (croissance de la végétation par exemple) en fonction des forçages externes de nature diverses (anthropique ou naturel) et de l'état physico-chimique du milieu. L'évolution spatio-temporelle de ce dernier est représentée par un modèle de transferts qui se décompose en 5 modules :

- transferts basse atmosphère (compartiment atmosphère)
- transferts verticaux en surface (Compartiment surface)
- transferts latéraux en surface : écoulements non concentrés (Compartiment surface)
- transferts latéraux en surface : écoulements concentrés (Compartiment surface)
- Transferts sous-terrains saturé/non saturés (compartiment sol/sous-sol)

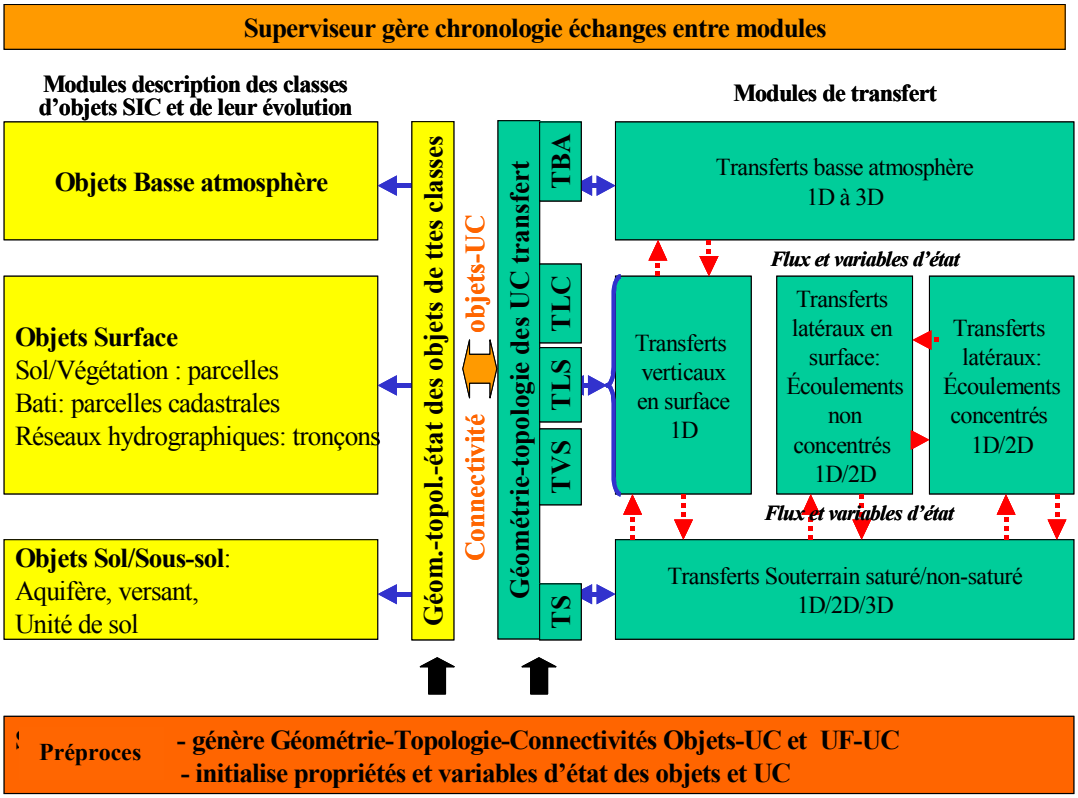
Pour chacun de ces modules, l'espace sera découpé en Unités fonctionnelles (UF) (l'ensemble de la basse atmosphère, la parcelle pour les transferts verticaux de surface, le versant pour les écoulements de surface non concentrés, le réseau hydrographique pour les écoulements de surface concentrés …) qui elles même sont subdivisées en unités de calcul (UC) lorsque cela est nécessaire (un versant doit être divisés en mailles pour représenter le ruissellement). Les objets, UF et UC seront définis de manière cohérente et les relations topologiques reliant ces entités seront placées dans une table de connectivités qui régira les échanges entre les modules de transferts et d'évolution des objets.

L'architecture modulaire

Le modèle développé dans SEVE s'appuie sur les modules d'évolutions de chaque objet et des modules de transferts mis en œuvre dans chaque UF. L'architecture du modèle permet d'identifier le flux d'échange entre les différents modules qui doivent répondre à un cahier des charges strict. L'implantation d'un module devra donc se référer à ce cahier des charges pour en définir les entrées et sorties. Nous analyserons dans une troisième partie comment cela peut se décliner pour intégrer un modèle de culture tel que STICS.
L'architecture générale est donnée dans la Figure 1. Celle-ci fait apparaître un préprocesseur qui permet de créer la segmentation et initialiser le modèle. Cette étape initiale est probablement celle qui sera la plus lourde lors de la mise en œuvre. Le projet SEVE devrait donc permettre de capitaliser un ensemble d'outils permettant de faciliter la tâche des utilisateurs. La figure fait également apparaître un superviseur qui doit gérer la chronologie des échanges entre modules.

Les variables échangées entre objets et compartiments ont été définies de manière aussi générique que possible de manière à rendre un grand nombre de modèles de fonctionnement (modèle TSVA, modèle hydrologique, modèle de culture) éligibles dans SEVE. Pour chaque module de transfert ou chaque classe d'objet, ces échanges ont été analysés et reproduits dans des diagrammes dont un exemple est donné en Figure 2.

Figure 1 : architecture générale de SEVE



Conclusions : Implantation des modèles de culture

Les composantes qui font le corps d'un modèle de culture sont réparties dans 3 modules : le module d'évolution de la classe d'objet "surface végétation" et les modules de "transferts sol" et "surface transferts verticaux". L'intégration d'un modèle comme STICS dans la plateforme de modélisation SEVE sera facilitée par une modularisation du modèle STICS. Toutefois, il nous semble important que si cette modularisation doit offrir un niveau fin avec une décomposition par processus; elle doit aussi permettre des regroupements en modules plus globaux regroupant une famille de processus. Ces modules "globaux" seront définis par une liste d'entrées sorties bien définie comme le suggère le diagramme 2. Dans la logique SEVE, un modèle de culture devrait se décomposer en trois modules (eux même comportant différentes fonctions) qui seraient "développement de la plante", "flux de surface et interaction avec le climat" et "sol". Un tel découpage pourrait être appliqué à d'autres couplages tels que le projet de couplage STICS-PASTIS ou STICS-ISBA. Pour SEVE, les diagrammes d'échanges ne sont pas encore complètement finalisés. L'analyse de l'implantation de STICS dans SEVE constitue une excellente occasion d'affiner les descriptions des échanges entre modules et en particulier ceux entre le module "développement de la plante" et les modules de transfert.

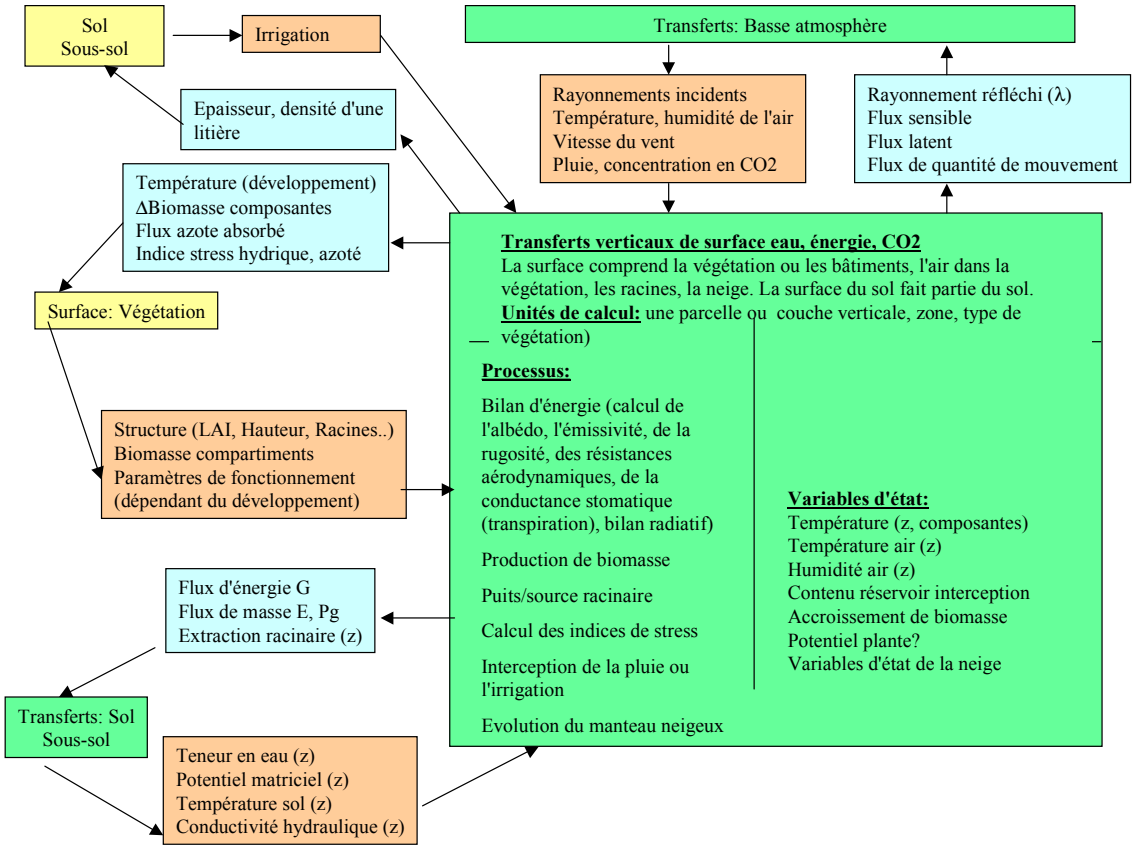


Figure 2 : Exemple de diagramme d'échange du module de transferts verticaux de surface.

PROJET : Assimilation de données satellitaires dans STICS, extrapolation spatiale à la région inter-salar (Bolivie) de production de quinoa

R. Bosseno

IRD UR 060 CLIFA La Paz, INRA UR CSE Avignon

rbosseno@avignon.inra.fr

Introduction

À plus de 3800 m, les producteurs de quinoa de l'Altiplano bolivien en 15 ans ont fait de la région du Gran Salar, contrée semi-désertique où le gel sévit plus de 250 jours par an, le premier exportateur mondial de cette pseudo-céréale aux propriétés nutritionnelles exceptionnelles. À la fois héritiers de modes de production élaborés dans les Andes depuis des millénaires, et acteurs opportunistes de la mondialisation des échanges, ils offrent un exemple parfait des relations complexes entre globalisation et agriculture. Cependant l'accroissement de cette activité augmente la pression sur un milieu fragile et menace sérieusement la durabilité de l'agriculture dans cette région.

Dans ce contexte un programme de recherche associant l'IRD (UR 060 CLIFA) aux facultés d'agronomie de La Paz et d'Oruro à été mis en place il y a quatre ans pour une meilleure connaissance du fonctionnement et des potentialités de cette plante. l'INRA (UR CSE) participe à ce programme depuis 2004 par l'utilisation de STICS comme outil pour comprendre le fonctionnement de cette culture au niveau agroécologique.

Il est prévu maintenant de spatialiser ces résultats en utilisant des données satellitaires, pour estimer l'extension de ces cultures et pour extrapoler les résultats obtenus au niveau parcellaire, au niveau régional, par assimilation ou forçage des données issues de la télédétection dans STICS. C'est l'objectif de ce projet.

Matériel et méthodes

La localisation des cultures de quinoa dans la région Inter-salar sera réalisée à partir d'images SPOT 2005. Une classification sera mise au point à cet effet en prenant en compte le stade de la culture (parcelles en végétation ou préparée pour le semis d'octobre). Dans un second temps cette classification permettra d'évaluer la dynamique de l'extension de cette culture dans la région depuis quinze ans (Bosseno, R. et al.). Elle sera réalisée à partir d'une série chronologique d'images SPOT.

L'assimilation de données satellitaires dans le modèle de fonctionnement culture aura pour objectif l'extrapolation spatiale de résultats de modélisation (Lebonvallet, S.) à la région agricole considérée dans cette étude. Quatre images SPOT ont été programmées pendant le cycle cultural de la quinoa dans la région de Salinas entre le 15 janvier et le 15 avril 2005 (programme ISIS-CNES). Cette programmation sera répétée en 2006. Des mesures radiométriques et des mesures de LAI effectuées par photographies hémisphériques seront effectuées in situ. Les méthodes envisagées sont soit le forçage du LAI ou du fAPAR, données issues plus ou moins directement de la réflectance du couvert, soit l'ajustement de paramètres pédologiques (profondeur du sol, caractère anoxique,…) ou techniques (date de semis, densité de levée,…). Si les données disponibles issues du réseau quinoa le permettent

on peut envisager d'inclure dans le modèle de transfert radiatif un modèle de croissance structurelle 3D simplifié de la plante.

Résultats attendus

Le résultat de ces travaux devrait permettre une meilleure estimation de l'évolution des surfaces cultivées depuis le démarrage de l'expansion économique de la culture de quinoa dans cette région, par la production de cartes issues des images satellitaires.

La spatialisation des résultats de la modélisation à cette région, peut être un outil d'évaluation du potentiel de cette culture face aux aléas agroclimatiques. Elle peut être envisagée comme un élément de gestion dans le cadre plus général de la conception d'un outil d'aide à la décision pour un développement durable de cette ressource.

Références

Lebonvallet, S. Utilisation du modèle STICS pour comprendre l'agrophysiologie des systèmes de culture à base quinoa sur l'Altiplano bolivien. (Thèse en cours).

Bosseno, R., Tichit, M.,Barrère, B., François, C ., Hidalgo, J., Moreau, S., Estudio de la biomasa y su evolución entre 1972 y 1995 en el cantón de Turco, provincia Sajama, departamento de Oruro. *Informe final del convenio CONPAC-Unión Europea / ORSTOM - ABTEMA, La Paz, 1997.*

L'introduction de la prise en compte des bioagresseurs dans STICS

M. Launay*, N. Brisson, P. Debaeke, J.N. Aubertot
INRA, Unité CSE, Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France.
**Corresponding author email:* mlaunay@avignon.inra.fr

Introduction

L'élaboration de nouveaux systèmes de culture à faibles niveaux d'intrants place les bioagresseurs parmi les facteurs limitants à prendre en compte dans les modèles de culture. Cependant, la diversité des adventices d'une part, et des maladies et parasites d'autre part, a jusqu'à présent été considérée comme rédhibitoire pour la représentation générique des effets des bioagresseurs sur la croissance et le développement du peuplement végétal. Jusqu'alors, la recherche a travaillé sur deux aspects distincts : l'effet des systèmes de culture sur la dynamique des populations de bioagresseurs, et l'effet des bioagresseurs (nuisibilité ou compétition) sur le fonctionnement des peuplements végétaux. Le projet de modéliser dans STICS ces deux types de processus de façon couplée, a été initié il y a deux ans par un groupe de chercheurs INRA constitué d'agronomes et d'épidémiologistes (Debaeke et al., 2003).

Schéma théorique

Le nouveau système modélisé est le système pédoclimat-plante-bioagresseur. STICS doit être capable dans cette nouvelle configuration de simuler le développement de la culture en interaction avec le pédoclimat et les techniques (comme auparavant) ainsi que le développement du bioagresseur en interaction avec le pédoclimat, les techniques et la culture. Notre proposition est de caractériser le bioagresseur par un ensemble de traits fonctionnels (Goldberg, 1997 et Cruz et al., 2002), qui définirait son niveau d'agressivité. Ce niveau d'agressivité correspondrait à un ensemble de variables d'état clef dans les interactions entre le bioagresseur, son environnement et la culture (Figure 1).

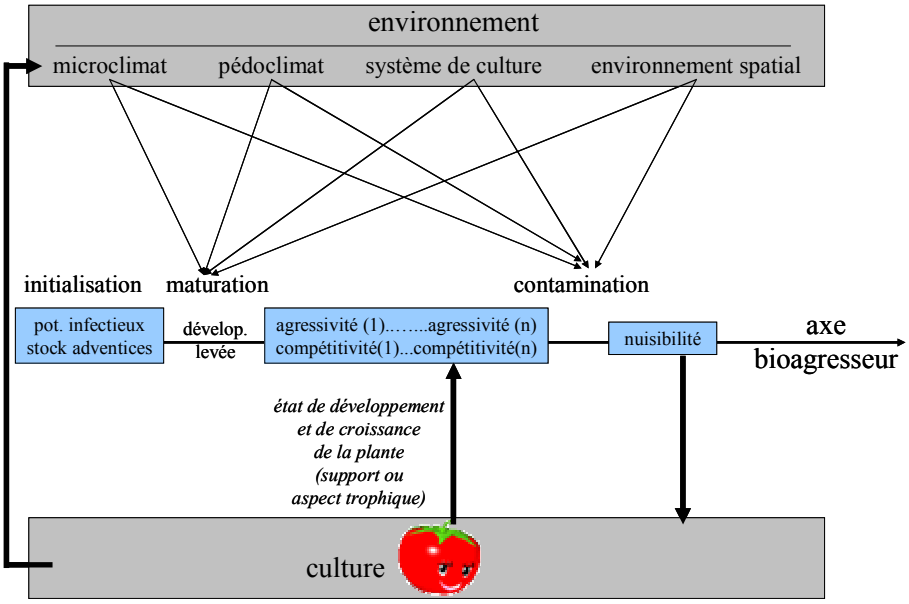


Figure 1. Schéma théorique de modéliser des interactions environnement-bioagresseur-culture dans STICS.

L'initialisation du module « bioagresseur » du modèle correspondrait à un potentiel infectieux dans le cas des maladies et parasites, et à un stock de graines dans le cas des adventices. Une typologie de situations rencontrées (système de culture x milieu x bioagresseur) permettrait d'estimer ce potentiel ou ce stock initial. La maturation du bioagresseur, que ce soit le développement du parasite ou la levée de l'adventice, correspondrait à un temps de latence dont la longueur serait variable en fonction de l'environnement. L'agressivité ou la compétitivité du bioagresseur serait défini par des traits fonctionnels et non des caractéristiques botaniques ou physiologiques. La « compétitivité » des adventices peut être déterminée par un LAI, une hauteur, une densité et une profondeur racinaires ; elle correspondrait donc à un niveau de compétition avec la culture pour l'interception du rayonnement, l'absorption d'azote et l'absorption d'eau. L' « agressivité » des maladies et des parasites serait déterminée par des variables mesurables telles que des proportions de surfaces foliaires nécrosées, en lien qualitatif ou quantitatif avec un niveau de contamination de la culture. L'état de développement de la plante pourra modifier l' « agressivité » de façon directe (statut azoté, surface foliaire ou racinaire développée, etc.), et la « compétitivité » de façon indirecte en modifiant l'environnement des adventices (effet de la culture sur le microclimat par exemple). Enfin, la nuisibilité serait également définie par des traits fonctionnels selon que le bioagresseur réduit la photosynthèse, empêche l'absorption racinaire, provoque des fontes de semis, etc.).

Méthode

Nous avons identifié 6 exemples pour lesquels ce schéma théorique va être testé : le phomopsis du tournesol et le phoma du colza (champignons aériens), le piétin échaudage (champignon tellurique), la pyrale du maïs (insecte), les nématodes de la betterave (faune du sol) et les adventices. Pour chacun des exemples, on identifiera les variables et les processus d'intérêt, les points de blocage (impossibilité pour le modèle de fournir des variables explicatives incontournables par exemple), et la façon dont on peut expérimentalement caractériser les relations entre le bioagresseur et la culture afin de prévoir ultérieurement des expérimentations spécifiques du développement, de la calibration et de l'évaluation du nouveau modèle.

Conclusion

Une « maquette » de modélisation devrait pouvoir être proposée fin 2005 à nos collègues épidémiologistes et écologues (chercheurs de l'INRA et chercheurs impliqués dans le Groupe De Recherche IBCTM), afin d'être discutée, modifiée, et introduite dans STICS.

References

Cruz, P., et al. (2002). *Fourrages, 172,* 335-354.
Debaeke, P., et al. (2003). *Séminaire STICS, 23-24 janvier 2003, Arles (France).*
Goldberg, D.E. (1997). *Cambridge University Press,* 283-306.

Sensibilité de « Stics 5-Arc info » à l'enchainement des cycles de simulation et à la resolution spatiale de la carte des sols

A Couturier, M. Banvillet,, B Nicoullaud, N Beaudoin
INRA, Unités de recherche de Science du Sol d'Orléans et de Laon - France.
*Corresponding author email: couturier@orleans.inra.fr,

Introduction

Dans les régions de grandes cultures, diverses procédures ont été mises en place pour réduire la pollution nitrique croissante des nappes souterraines sous-jacentes. L'évaluation de l'impact de ces changements de pratiques sur le lessivage du nitrate, à l' échelle du bassin d'alimentation en eau potable, n'est pas possible directement, sauf sur des périmètres drainés. Des travaux de quantification du lessivage du nitrate à l'échelle du bassin ont déjà été entrepris pour coupler STICS 4 et Arc info (Brisson *et al*.,2003 ; Nicoullaud et al, 2004). Ce modèle spatialement distribué a été déjà été utilisé par Ponsardin, 1999 et Schnebelen, 2000. Cependant ce genre d'outil peut être sensible aux méthodes utilisées pour initialiser le modèle et pour décrire les propriétés du sol. L'objectif est de prendre en compte les potentialités de la version 5 du modèle, d'effectuer les traitements sous une plate-forme Windows et d'analyser la sensibilité de l'outil aux échelles de temps et d'espace utilisées pour sa mise en œuvre (Banvillet, 2003). Les variables de sortie obtenues après enchaînement des simulations, pendant plusieurs années, sont comparées à celles obtenues après une réinitialisation annuelle du modèle. Les sorties obtenues en utilisant 2 niveaux de résolution de cartographie des sols sont également comparés. Le support d'illustration est le bassin d'alimentation de Bruyères (F-02).

Matériels et méthodes

Le bassin d'alimentation de Bruyères est un plateau de 187ha, dont 137 en céréales et grandes cultures, situé 10km au sud de Laon (02). Les systèmes de cultures incluent principalement le blé tendre, la betterave sucrière, l'escourgeon, le pois protéagineux et le colza. Il montre une forte variabilité spatiale des sols. Une cartographie précise des sols a abouti à définir 430 unités, cartographiques selon une méthode proche de la carte de l'Aisne au 1/25000e. Une deuxième cartographie a consisté à dresser une typologie de 27 classes en fonction du substrat et de l'épaisseur du sol et définissant 170 unités cartographiques (figure 1). Les 21 parcelles agricoles du bassin ont des limites assez stables au long des 10 ans d'étude (figure 1). Les techniques culturales y sont homogènes (Beaudoin et al, 2004). Des fonctions de pédotransfert locales ont été établies afin de permettre de renseigner les paramètres du sol du modèle STICS (Ponsardin, 1999). Des acquisitions de données portant sur les stocks d'azote du sol et les cultures sont effectuées sur 36 stations de mesures du bassin ; elles permettent d'initialiser le modèle et de le tester ponctuellement (Beaudoin *et al*., poster).
La mise en oeuvre de STICS est gérée par le Système d'Information Géographique (SIG) Arc Info, qui organise les données, géographiques ou non spatialisées, pour créer les entrées du modèle de culture (Nicoullaud et al, 2004). Le croisement des limites d'unité de sol et du parcellaire permettent de définir les *ucsi*, unité cartographiques de simulation. L'initialisation du modèle sur l'ensemble des *ucsi* peut se faire selon deux procédures : (i) annuellement, par apparentement de chaque ucsi à une des 36 stations ayant fait l'objet d'une acquisition de données initiales, (ii) par simulation de l'année antérieure par le modèle avec enchaînement des années. Le SIG est programmé pour gérer les sorties de simulation en les consolidant aux échelles de la parcelle culturale ou du bassin. Cette méthode d'agrégation ne prend pas en compte les interactions entre *ucsi* tant pour les flux d'eau que pour les pratiques agricoles. Des étapes supplémentaires ont consisté à :

- adapter le modèle sous un environnement Windows NT : architecture des espaces de travail, variables d'environnement ;
- préparer et mettre en forme la base de données géographiques nécessaire aux simulations et adapter cette base de données à la version 5 de STICS;
- mettre en œuvre sous Arc/Info les programmes en langage « AML » qui font fonctionner le modèle ;
- lancer des simulations proprement dites grâce à l'AML *Stics* à l'échelle parcellaire ou du bassin ;

Les variables d'intérêt sont celles qui déterminent le lessivage d'N à court ou moyen terme, ca.d.: *Resmes, Azomes*, *Masec, QNPlante et de Magrain*.

Résultats

La mise en oeuvre de la version STICS 5 sur les 8 ans pour 400 unités de sol du bassin de Bruyères a révélé certains problèmes de simulation : absence de levée de cultures de pois ou colza ou sous estimation des rendements des cultures de pois, blé et maïs qui demandent d'améliorer le paramètrage du modèle.

En utilisant les simulations fondées sur des mesures annuelles, il est possible d'évaluer l'impact du degré de résolution de la carte des sols, en faisant l'hypothèse que les problèmes précités n'interfèrent pas dans la comparaison. La carte des sols simplifiée a été utilisée et nous avons vérifié que cette simplification n'altérait pas globalement les résultats (figure 2). Les valeurs des moyennes à l'échelle du bassin sont proches, mais pour certaines parcelles,

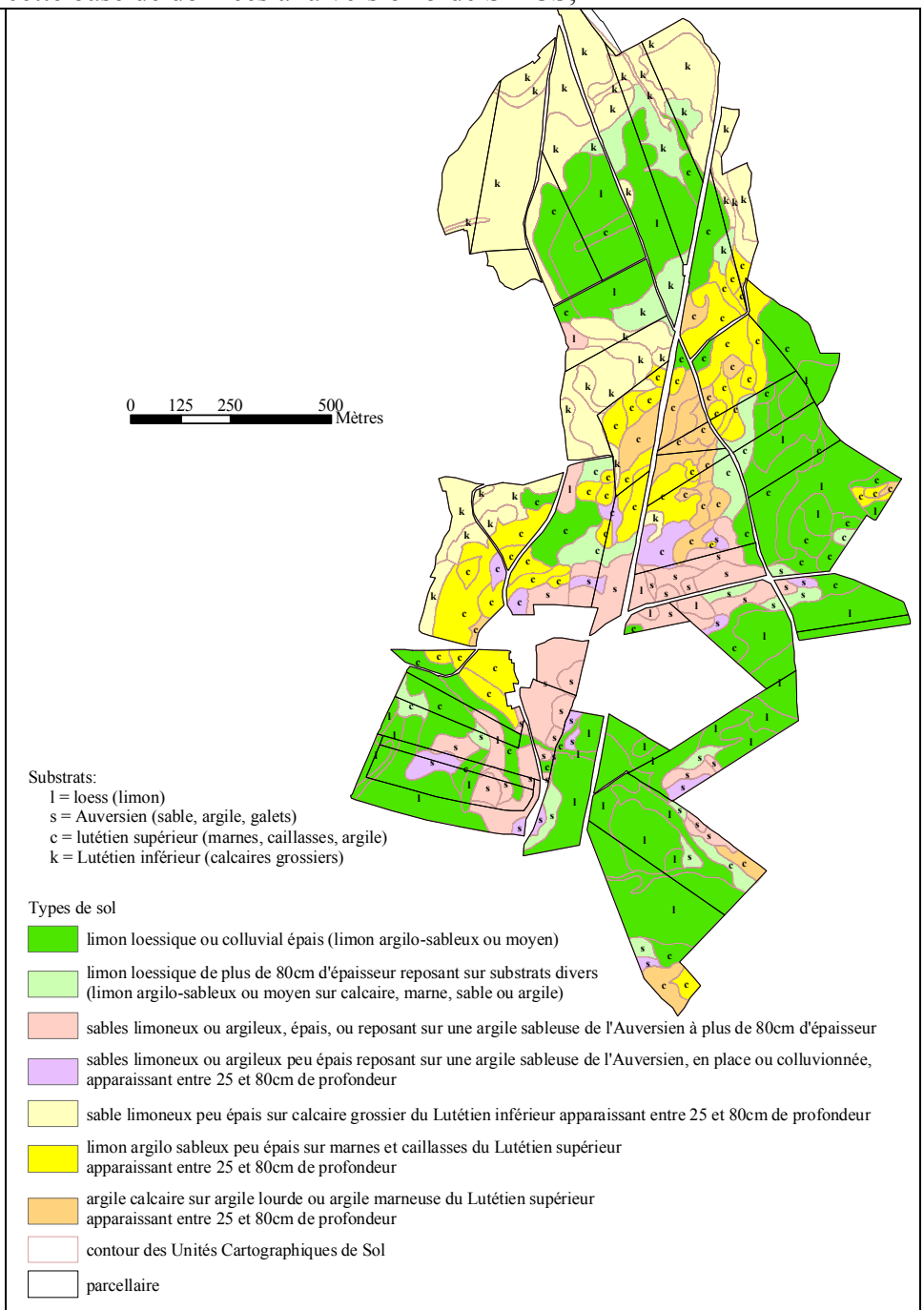
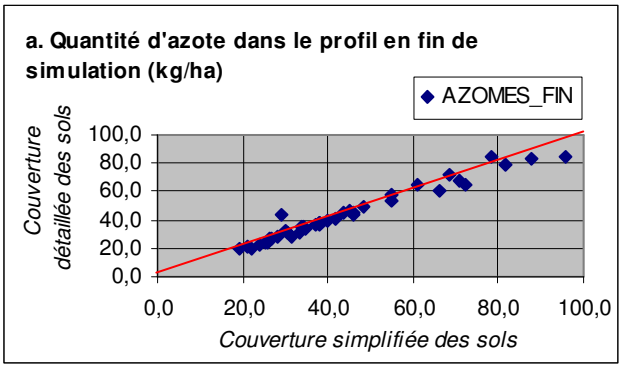
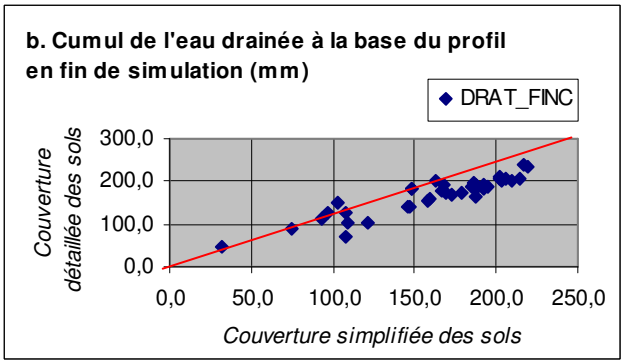
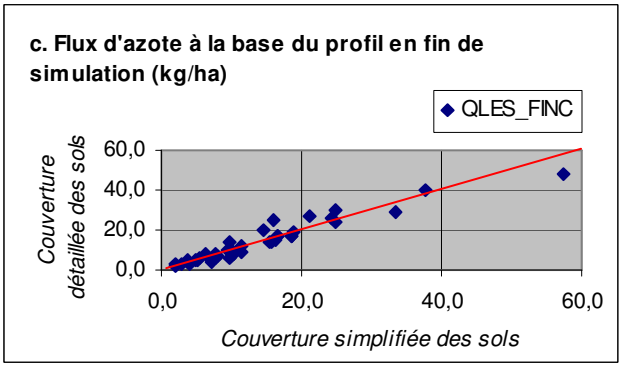


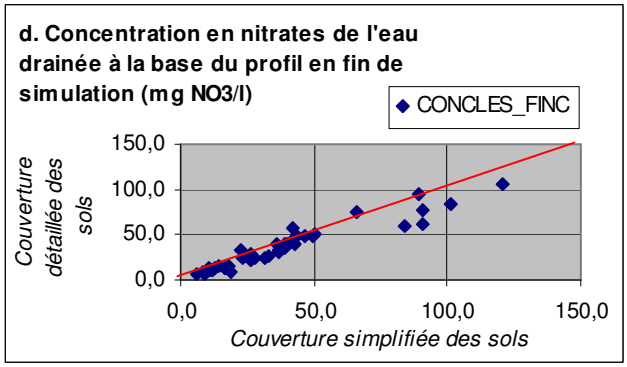
Figure 1 : Carte des sols simplifiée avec surimposition des limites parcellaires du bassin de Bruyères (F-02).

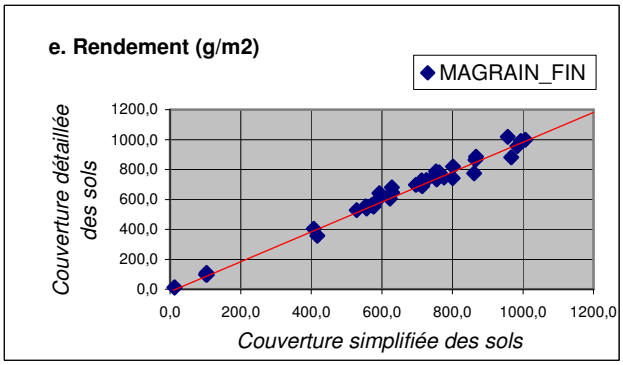
les différences sensibles sont dues certainement à la façon dont les sols ont été regroupés localement. La simplification des données sol n'introduit pas de biais important avec cette version. Au contraire, elle permet une meilleure interprétation des cartes de rendement (Beaudoin et al, 2002).











Cartographie des sols	simplifiée	détaillée
AZOMES_FIN (kgN/a/an)	44,7	44,4
DRAT_FINC (mm)	159,9	162,4
QLES_FINC (kgN/ha/an)	13,1	13,3
CONCLES_FINC (mgNO3/l)	36,3	36,2
MAGRAIN_FIN (g/m²)	648,0	640,7

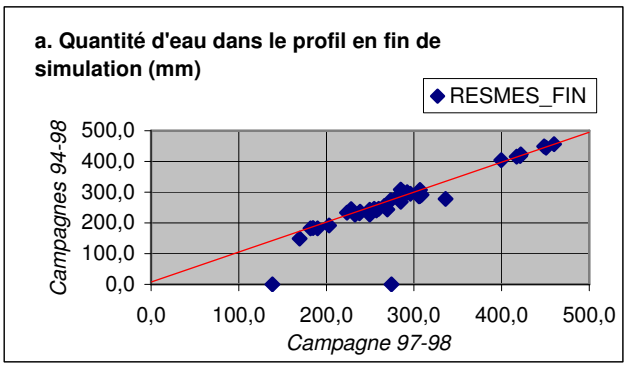
f. Moyennes pondérées pour tout le bassin**.**

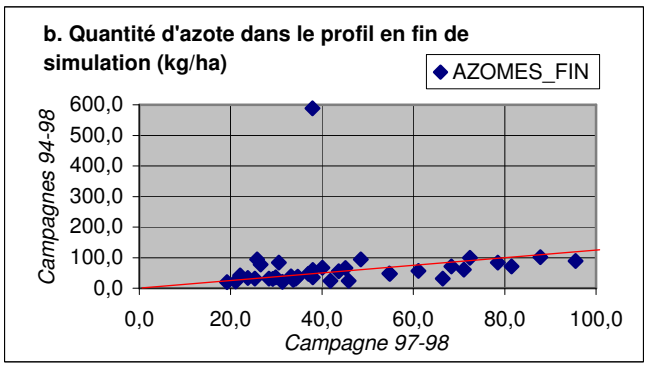
Figure 2 : Comparaisons des résultats par type de couverture des sols : carte simplifiée ou carte détaillée .

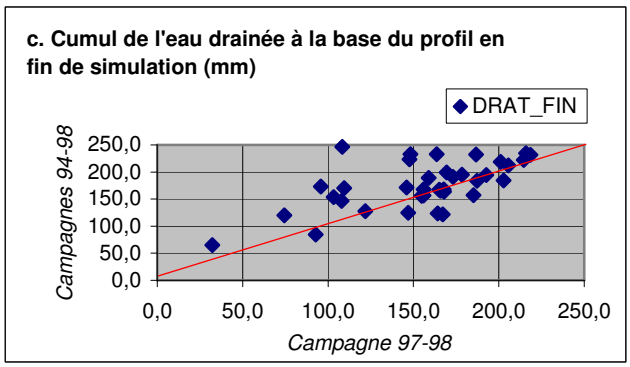
Les simulations enchaînées sont fonctionnelles. Les résultats des simulations obtenues pour l'année 1997-1998 sont comparés soit à partir des mesures initiales faites en 1997, soit à la fin d'une simulation enchaînée (1994-1998) avec une initialisation faite en 1994 (Figure 3). Les résultats font apparaître des données aberrantes sur les variables *RESMES* et *AZOMES* (valeur à 600 kg/ha) montrant, soit des erreurs d'apparentements, soit des erreurs dans les fichiers techniques ou dans les enchaînements de parcelles pour lesquelles les simulations ne s'effectuent pas (valeur à 0). Il apparaît ensuite que les variables environnementales sont sensiblement différentes, certainement en raison d'un processus de propagation d'erreur.

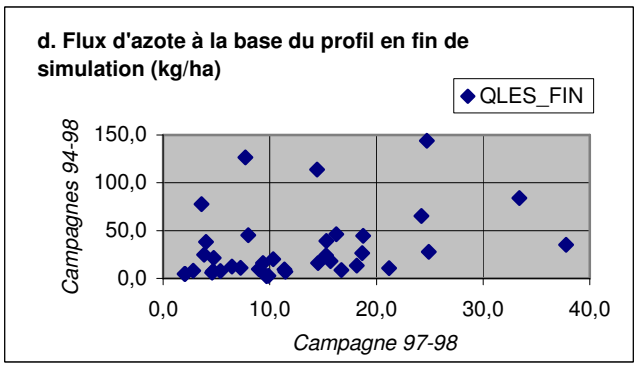
Il en ressort qu'il reste à vérifier les procédures d'apparentements en comparant année par année les différentes variables (avec initialisation annuelle ou non) et en cherchant pourquoi

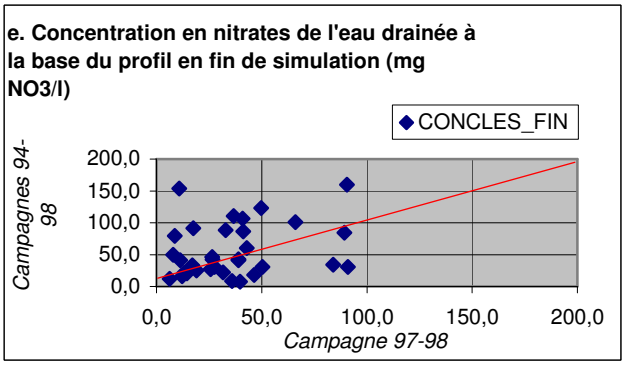
certaines simulations ne s'effectuent pas. De même, une phase de validation à plusieurs niveaux devra être entreprise en parallèle, en s'appuyant sur les données acquises sur les 36 stations de mesures et sur les cartes de rendement.











Année initialisation	1997	1994
RESMES_FIN (mm)	291,5	285,3
AZOMES_FIN (kgN/ha)	44,5	67,1
DRAT_FIN (mm)	155,5	175,9
QLES_FIN(kgN/ha)	12,7	31,9
CONCLES_FIN mgNO3/l)	37,5	81,5

f. Moyennes pondérées sur tout le **bassin.**

Figure 3 **:** Résultats de l'exercice 1997/98 selon le type de simulation : annuelle ou enchaîné.

Conclusions

- Bien que le site de Bruyères montre une forte variabilité pédologique, la simplification de la carte des sols ne devrait pas modifier les résultats calculés aux échelles parcellaire ou du bassin.
- Bien que les simulations enchaînées soient fonctionnelles, nous avons pu constater qu'il semble exister certains biais importants (erreurs en entrées ou propagation d'erreurs). Une phase de validation à plusieurs niveaux devra être entreprise en parallèle. En l'état actuel du système, la meilleure option est d'utiliser les simulations avec initialisation annuelle à partir des données mesurées en attendant les corrections à effectuer pour l'option « simulations enchaînées ».
- Cette application est lourde à mettre en œuvre et demande une maîtrise du logiciel Arc/Info : Un transfert sous ArcView pourrait rendre plus accessible son utilisation.

References

Banvillet M. 2003. Mémoire de DESS géomatique. Université d'Orléans. 60 pages.
Beaudoin N. et al, 2002., VII Congress of the E.S.A., Cordoba, Spain, 15-18 july; pp. 669-670.
Beaudoin N., *et al*., 2004. In Monestiez *et al*., Coll. Science Update, INRA Eds, p 117-141.
Brisson, N., *et al*. ,2003. *European Journal of Agronomy, 18,* 309-332.
Nicoullaud B. *et al*., 2004. In Monestiez *et al*., Coll. Science Update, INRA Eds,p 143-161 ;
Ponsardin G., 1999. Mémoire *ENSA Rennes*, 56 p + annexes
Schnebelen,N., 2000. *Thèse de docteur de l'université d'Orléans*. 309 p+annexes.

BIBLIO

BIBLIOSTICS

Articles dans revues à comité de lecture

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.

Affholder, F., Scopel, E., Madeira Neto, J., et Capillon, A., 2002. Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil. *Accepté à Agronomie*.

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. P. Monestiez, S. Lardon et B. Seguin 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. p. 329-349.

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., 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., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussière, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillère, F. Maraux, F. B. Seguin, H. Sinoquet, 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy, 18, 309-332

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

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., 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., 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., Bussière, 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

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.

Chauki, H., Brisson, N., Prévot, L. 2003. Experimental modelling of the dynamics of wheat water content. Agronomie 23, 537-544.

Courault D, Ruget F, 2001. Impact of local climate variability on crop model estimates in the south-east of France. Climate research, vol18, 195-204.

Courault D, Garcia F, Chatelain MH, 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. P. Monestiez, S. Lardon, B. Seguin Edts. Collection Science Update, INRA Editions, Paris, 321-336

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., 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, 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.

Flénet F., Villon P., Ruget F. 2004. Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop : spring linseed (Linum usitatissimum, L.). Agronomie vol. 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.

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

Levrault, F., Ruget, F. 2002. COGITO. Cogito, un modèle pour l'irrigatin 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.,

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.

Morvan T, Alard V et Ruiz L 2000 Intérêt environnemental de la betterave fourragère. Fourrages 163, 315-322.

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. Beaudoin, B. Mary, C. Coutadeur et D. King, 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. P. Monestiez, S. Lardon et B. Seguin 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., Ottlé, 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.

Prévot 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.

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 ans the STICS model in the semiarid Yaqui valley, Mexico, Agronomie 24 : 295-304.

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., Bonneviale, 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, Malézieux, Trébuil, Jaeger ed.,263-282.

Ruy S Lafolie F., N Brisson, Mary B., Ribolzi O., .Evaluation of two crop models in maize fields with different irrigation rates

Ruy S., Lafolie F., Brisson N., Mary B., Ribolzi O.Modelling the agricultural and environmental consequences of non-uniform irrigation on maize crop. 2. Nitrogen balance

Schnebelen N., Nicoullaud 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.

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.

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. Persp. Agr., 243, 87-95.

Tayot X., Ruget F., Bouthier A., Lorgeou J., Lacroix B., Pons Y., 1999. " STICS en Poitou-Charentes : alibration et validation sur maïs et sorgho " Perspectives Agricoles ", n° 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 ", n° 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., Olioso, 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

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, pp 231.

Beaudoin N, Makowski D, Mary B, Wallach D, Pardoneau V, Parisseaux B, Machet JM, Meynard JM, 1997 Evaluation de l'impact économique et environnemental de la mesure agri-environnementale "réduction d'intrants" au moyen de modèles agronomiques Rapport interne

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 pp)

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, 101p.

Boutant S., 2003. -Effets des couverts en interculture sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes : Etude de cas par simulation STICS. Mémoire de fin d'études, ENITA Clermont Ferrand, 45p.

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. 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 pages.

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, nov. 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 pages

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. Thèsis of 'INA-PG, Paris, pp 171.

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, 24pp + annexes.

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.

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 Laon (Resp. N. Beaudoin).

Diquelou G 1998 Couplage d'un modèle de fonctionnement d'un agrosystème avec un modèle hydrologique. Mémoire DESS, IFSIC, Rennes. 31p + annexes.

Domergue, M. 2001. Impact du réchauffement climatique sur le parcours phénologique d'espèces / variétés fruitières dans la vallée du Rhône. Diplôme Ingénieur ESITPA, pp 56.

Donet I., Ruget F., Le Bas C., Rabaud V., 2000. Guide d'utilisation d'ISOP. SCEES ed., 45 p. +annexes, en cours.

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.

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, 41p.

Flénet F. 2004. Le lin oléagineux relancé en Picardie. Oléoscope n°79. 26-27.

FRANCOIS Laurence - 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), 2001 - 88 p., ann., 49 réf. (Mémoire d'ingénieur et de DEA)

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.

Garcia de Cortazar Arauri, I. 2001 Méthodologie de l'analyse de la qualité du blé dur en région méditerranéenne. Diplôme ISARA Lyon pp59.

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.

Gonzalez-Camacho J. M., 2002. Impacts attendus du changment 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 changment climatique dans le Bassin Versant du Rhône, 59 p.

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 pp)

Grosbuis P. Analyse de sensibilité d'un modèle de prédiction de rendement. ENSA Rennes (Ingéniérie mathématique), 100p., mémoire à présenter le 28 septembre 1998.

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 (Ingéniérie informatique), 52 p. +annexes, mémoire présenté le 15

septembre 1998.

Hannot Y 1999 Intégration d'un modèle agronomique et d'un modèle hydrologique. Analyse et mise en œuvre. Mémoire DESS, IFSIC, Rennes. 24p + 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 Laon-Reims (Resp. B Mary).

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.

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 deBTSA Technologie Végétale, Lycée d'Aix-Valabre; INRA Bioclimatologie Avignon, 60 pp.

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

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,pp20.

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, pp 35.

Keichinger O. 1996, Mise au point d'une méthode d'estimation des pertes en polluants sous une bande herbeuse. Mémoire DEA ENSAIA Nancy, 32p

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, 31p + annexes

Lebonvallet, S., 2002. Simulation de l'azote chez le blé dur et impacts des changements climatiques. DEA Adaptation des plantes cultivées aux contraintes environnementales, pp29 + annexes

Lecoq R., 2002. Paramétrisation du modèle STICS-vigne reposant sur quelques situations caractéristiques du vignoble des Côtes du Rhône méridionales. Mémoire ENITAB 52pp.

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 50p.

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

Levrault F., Tayot X., Ruget F., Ripoche D., 2000. Cogito 1.0, manuel d'utilisation, Chambre régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, 42p.

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 Myriam, 2003. *Analyse et modélisation de la réponse de génotypes de tournesol à la conduite de culture,* Mémoire de fin d'études, ESA Purpan, Mai 2003, 72 p.

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, 43 pages + 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 49p.

Minette S., 2004. -Evaluation du logiciel de simulation STICS en Poitou-Charentes. Rapport interne. Agrotransfert, Lusignan, 38p.

Negri I, 2001.Adaptation du modèle de simulation STICS prairies aux conditions de la région de la Pampa de la République argentine. 15 p + annexes. Mémoire de stage, Université agronomique de Buenos Aires.

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.

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 + annexex.

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

Pantel J., mars 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 Monpellier 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. 56p + annexes.

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, 74pp+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'ingéneiur d'agronomie, ENESAD, Dijon, 60 p. +biblio. + 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 détude de l'ENSAR,54 p +annexes.

QuéréL., 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 (106pp)

Régat M (1997) Etude et modélisation de l'élaboration du rendement de la tomate à croissance déterminée en milieu tropical. rapport de DEA , 25pp

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

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 , 24p+annexes

Saby N., Walter C., Combo S., Quidu O. 1999 Constitution et Thématisation 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.. Analyse de sensibilité du modèle de simulation STICS-prairie. IUT Vannes (Statisitique et traitement informatique des données), 46 p.+annexes, mémoire présenté le 22 juin 1998

Schnebelen N, 2000 : Analyse et modélisation de l'impact de la maïtrise 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 pp

Smith P. 2001. Adaptation de STICS à la canne à sucre. mémoire DAA ENSA Rennes

Tiers N. 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. Présenté le 24 septembre 1997

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, sept 1998.

Valdes H., mémoire de master

Zanolin A (2002, en cours), 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.

Communications dans des colloques

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, pp952-959.

Affholder F., Madeira Neto J., Scopel E., 2004. Yield gap assessment and diagnosis in Brazil using a crop model. Crop Science for a better world, Brisbane.

Beaudoin N., Makowsky D., Parnaudeau V., Mary B. (1999) Impact of agricultural scenarios on nitrate pollution at the catchment scale. 10th Nitrogen Workshop, Copenhague (SU) 99/08/23-26 , Royal Veterinary and Agricultural Workshop,Abstracts vol 2, IV6.

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; pp. 669-670.

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 integral)

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., 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., Ruget F., Jeuffroy M.H., Dorel M., Gay J.P., 1999 Evaluation of the genericity of the STICS model. Worshop on crop modelling, Lerida, juin 1999

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.,Tournebize R., Bussière 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. Worshop on crop modelling, Lerida, juin 1999

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.

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. ESA, Copenhague.

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.

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 5ème Séminaire des utilisateurs de STICS*, Arles, 23-24/01, pp. 92-95.

Donet I., Ruget F., Rabaud, V., Pérarnaud V., Delécolle R., Bonneviale N., 1999. ISOP: an integrated system to real-time assessment of forage production variability over France. ECAM 99, Nordköping.

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 leachning. Proceedings of the 11th nitrogen workshop, 9-12 sept. Reims, France, 439-440

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., 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)

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.

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., 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; pp. 631-632.

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 second international symposium on modelling cropping system. July 16-18 2001 Florence (Italy), 67-68.

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-spécific 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.

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. pp. 522-524.

Minette S., Justes E. et Boutant S., 2004. -Effets des couverts en interculture sur l'eau et l'azote du sol en Poitou-Charentes : Etude de cas par simulation STICS. In : Savoirs et savoir-faire sur les bassins versants, colloque, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, Rennes, pp.253-254.

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 statisrtics for production ecology. 19-21 april 1999, Wageningen.

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 Brieuc 29-30 avril 1999. 167-176.

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.

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., Valdes 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 (VIIthe region of Chile). XXVIth International Horticultural Congress and Exibition, 11-17 August, Toronto, Canada

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. , 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.

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., 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., 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., 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.

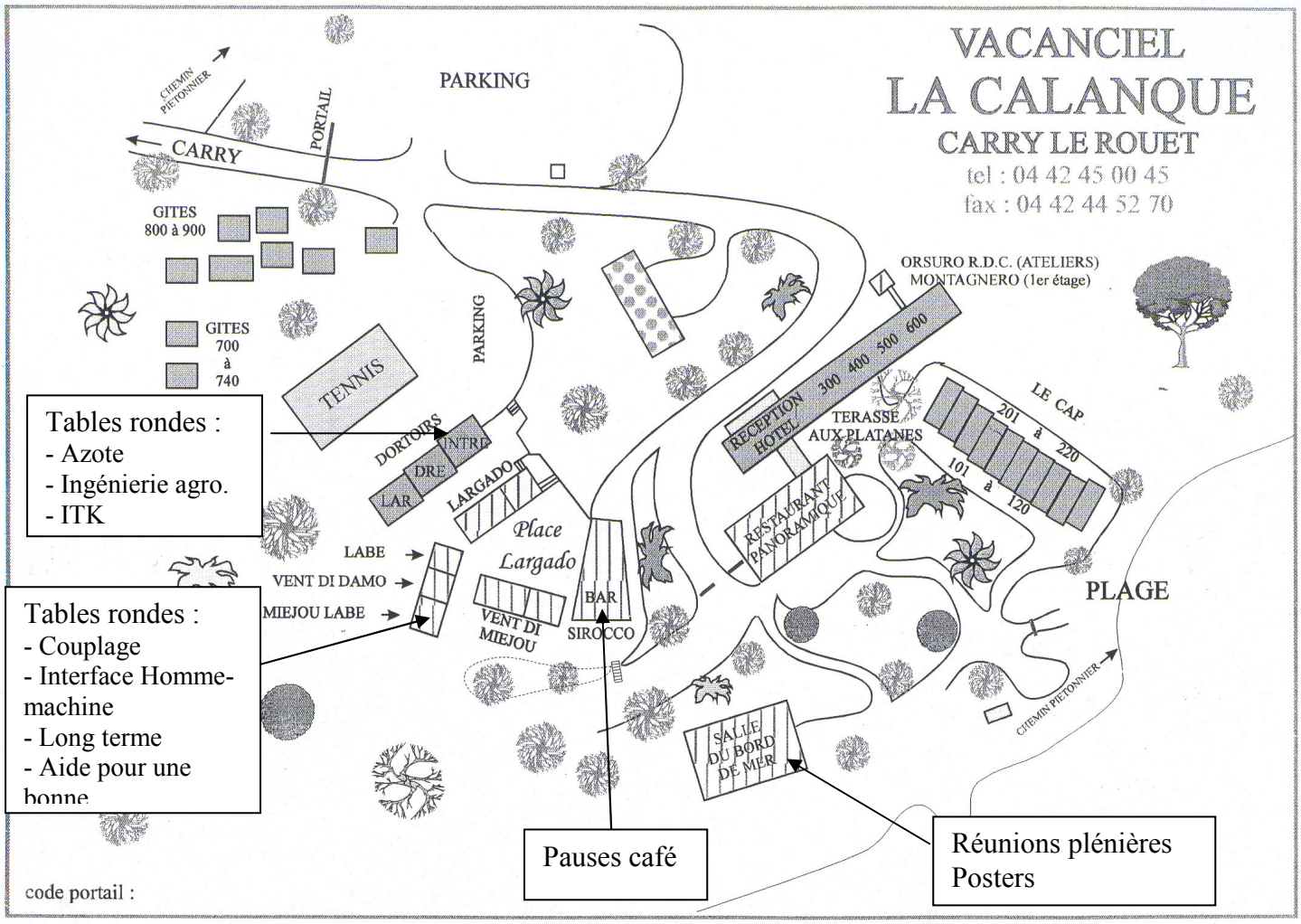
Ruget, F., Di Bella, C., Faivre, R., Seguin, B., Guérif, M., 2004. Estimation of the grassland production through the ISOP system : use of vegetation images for improving the grassland STICS model spatial outputs. Proceedings of 8th ESA Congress "European Agriculture in a Global Context", Copenhagen, Denmark, 11-15 July, 2004, 333-334.

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)

Les participants

nom	prenom	organisme	ville	email
affholder*	françois	CIRAD	HANOI (Vietman)	affholder@cirad.fr
balesdent	jérôme	Laboratoire d'Ecologie Microbienne de la Rhizosphère	Saint-Paul lez Durance Cedex	balesdent@cea.fr
baranger	edouard	UMR Economie Publique	THIVERVAL GRIGNON	barangeredouard@hotmail.com
baret*	frédéric	CSE	Avignon	baret@avignon.inra.fr
baron	christian	Cirad	Montpellier Cedex 5	christian.baron@cirad.fr
beaudoin*	nicolas	INRA	Laon Cedex	beaudoin@laon.inra.fr
beha	anita	Lufa Augustenberg	Karlsruhe (Allemagne)	anita.beha@lufa.bwl.de
bellostas muguerza	natalia	RISOE	Roskilde (Danemark)	natali.bellostas.muguerza@risoe.dk
ben haj salah*	halim	INA Tunisie	Tunis (Tunisie)	halimbhs@yahoo.com
bernard	paul	CSE	Les Angles	pbernard@avignon.inra.fr
bernard*	pierre-yves	INRA Mirecourt	MIRECOURT	bernard@mirecourt.inra.fr
bertin	pascal	SGV Le Moulon	Gif sur Yvette	bertin@moulon.inra.fr
bertrand	nadine	cse - climat	avignon	bruguier@avignon.inra.fr
bosseno	roland	IRD	Avignon Cedex 9	rbosseno@avignon.inra.fr
boutin	florent	Chambre d'Agriculture de Vaucluse	Vaison-la-Romaine	florent.boutin@fr.oleane.com
brisson*	nadine	CSE	avignon	brisson@avignon.inra.fr
carlón gómez	josé ramón	UEPF	Lusignan	carlon@lusignan.inra.fr
celette*	florian	UMR SYSTEM	Montpellier Cedex 5	celette@cirad.fr
cezera	stephane	LERNA	toulouse	cezera@toulouse.inra.fr
chanzy	andré	CSE	Avignon	chanzy@avignon.inra.fr
chardon	xavier	INSTITUT DE L\'ELEVAGE	PARIS CEDEX 12	martine.marie@inst-elevage.asso.fr
chevalier	mathieu	EnviCare	Paris	mathieu.chevalier@envi-care.com
clastre	philippe	CSE	Avignon	clastre@avignon.inra.fr
corre-hellou*	guénaëlle	ESA	Angers	g.hellou@esa-angers.educagri.fr
couturier*	alain	INRA Orléans	OLIVET	alain.couturier@orleans.inra.fr
crespo	olivier	BIA Toulouse	Castanet Tolosan	olivier.crespo@toulouse.inra.fr
de noblet-ducoudré	nathalie	CEA	Gif-sur-Yvette cedex	nathalie.de-noblet@cea.fr
debaeke*	philippe	UMR 1248 ARCHE	Castanet-Tolosan cedex	debaeke@toulouse.inra.fr
debove	elodie	UMR Economie Publique	Thiverval Grignon	elodie.debove@grignon.inra.fr
desfonds*	véronique	CSE	Avignon	desfonds@avignon.inra.fr
dibet	audrey	ESA	Angers	a.dibet@groupe-esa.com
duchemin*	benoit	CESBIO-IRD	Toulouse cedex 9	duchemin@ird.fr
duparque*	annie	AlternatecH, Agro-Transfert	Estréees-Mons	annie.duparque@alternatech.org
durand	jean-louis	UEPF	Lusignan	jldurand@lusignan.inra.fr
durand*	patrick	UMR SAS Rennes	Rennes Cedex	patrick.durand@rennes.inra.fr
fabre*	frédéric	UMR INRA-ENSAT ARCHE	CASTANET-TOLOSAN	fabre@toulouse.inra.fr
faivre	robert	BIA - Toulouse	Castanet-Tolosan	faivre@toulouse.inra.fr
fels	patrick	APCA Esitpa	Val de Reuil	pfels@esitpa.org

			cedex	
flénet*	francis	Agro-Transfert / AlternatecH	Estrées-Mons	francis.flenet@alternatech.org
flipo	nicolas	CIG, ENSMP	Fontainebleau	nicolas.flipo@ensmp.fr
gabrielle	benoit	UMR INRA INA P-G Environnement et grandes cultures	Thiverval-Grignon	benoit.gabrielle@grignon.inra.fr
garcia de cortazar atauri*	inaki	CSE	Avignon	igarcia@avignon.inra.fr
gary*	christian	UMR SYSTEM	Montpellier CEDEX 5	gary@cirad.fr
godard*	caroline	UMR Economie Publique	THIVERVAL GRIGNON	caroline.godard@grignon.inra.fr
goutouly	jean-pascal	UMR Œnologie-Ampélologie - ECAV	VILLENAVE D'ORNON	goutouly@bordeaux.inra.fr
graux	anne-isabelle	CSE	Avignon	anne-isabelle.graux@avignon.inra.fr
guérif*	martine	CSE	Avignon	mog@avignon.inra.fr
guy	karine	CIREF	prigonrieux	guy@ciref.asso.fr
hadria*	rachid	Faculté des Sciences Semlalia	marrakech	r.hadria@ucam.ac.ma
heuer*	antje	Université Trier	Trier (Allemagne)	heuer@uni-trier.de
houlès*	vianney	CNES	Montpellier Cedex 5	houles@teledetection.fr
hue	carine	UMR ARCHE	Castanet Tolosan Cedex	chue@toulouse.inra.fr
isbérie*	carole	Cemagref	AIX-EN-PROVENCE CEDEX 1	carole.isberie@cemagref.fr
jayet*	pierre-alain	UMR Economie Publique	Grignon	jayet@grignon.inra.fr
justes*	eric	UMR ARCHE	Castanet-Tolosan	justes@toulouse.inra.fr
launay*	marie	CSE	Avignon Cedex 9	mlaunay@avignon.inra.fr
lauvernet*	claire	CSE	avignon	lauverne@avignon.inra.fr
le bas*	christine	InfoSol	OLIVET CEDEX	christine.le-bas@orleans.inra.fr
le sueur	damien	CIVC	Epernay cedex	damien.le-sueur@civc.fr
lebonvallet*	sophie	INRA CSE - IFEA - IRD CLIFA	La Paz (Bolivie)	foflebonval@hotmail.com
lecomte	isabelle	UMR SYSTEM	MONTPELLIER	lecomte@ensam.inra.fr
lemaire	gilles	UEPF Lusignan	Lusignan	lemaire@lusignan.inra.fr
levrault	frédéric	Chambre Régionale d'Agriculture Poitou-Charentes	Mignaloux Beauvoir	frederic.levrault@poitou-charentes.chambagri.fr
martinez*	anne-marie	CIRAME	Carpentras	martinez-am@cirame.asso.fr
mary*	bruno	LAON	LAON	mary@laon.inra.fr
mastrorilli	marcello	CRA - ISA-Bari	Bari (Italie)	marcello.mastrorilli@tin.it
mention*	philippe	CTIFL	BELLEGARDES	mention@ctifl.fr
merot	anne	Société du Canal de Provence	Aix en Provence	annemerot@yahoo.fr
meurdesoif	yann	CEA	Gif-sur-Yvette cedex	yann.meurdesoif@cea.fr
minette	sébastien	Chambre Régionale d'Agriculture Poitou-Charentes	Mignaloux Beauvoir	sebastien.minette@poitou-charentes.chambagri.fr
moitrier	nathalie	CSE	Montfavet	moitrier@avignon.inra.fr
moitrier	nicolas	PSH	Montfavet	nmoitrie@avignon.inra.fr
muller	bertrand	CIRAD	Montpellier Cedex 5	bertrand.muller@cirad.fr
nesme*	thomas	ENITA de Bordeaux	Gradignan cedex	t-nesme@enitab.fr

niang*	binta	Economie Publique	THIVERVAL GRIGNON	binniang@grignon.inra.fr
olioso	albert	inra cse	avignon	olioso@avignon.inra.fr
parnaudeau*	virginie	Agronomie Laon-Reims-Mons	REIMS	parnaude@reims.inra.fr
payan*	jean-christophe	ITV France	GRABELS	jean-christophe.payan@itvfrance.com
poupa*	jean-claude	INRA-ESR	Rennes cedex	poupa@rennes.inra.fr
ramel*	jean-pierre	CIRAME	Carpentras	ramel-jp@cirame.asso.fr
rat	alexandre	cig ensmp	fontainebleau	rat@cig.ensmp.fr
ripoche*	dominique	inra cse	avignon	domi@avignon.inra.fr
rousse*	nathalie	ARCHE	Castanet Tolosan Cedex	rousse@toulouse.inra.fr
ruget*	françoise	INRA CSE	AVIGNON cedex 9	ruget@avignon.inra.fr
sahli	ali	Institut National Agronomique de Tunisie	Tunis	sahli_inat_tn@yahoo.fr
satger	sylvain	CSE	Avignon	ssatger@avignon.inra.fr
sauboua	emmanuelle	PSDR	Grenoble cedex 9	sauboua@grenoble.inra.fr
schnebelen*	nathalie	INRA Orléans Infosol	Olivet Cedex	nathalie.schnebelen@orleans.inra.fr
smith*	pascalle	LSCE (et Agroclim)	GIF-SUR-YVETTE	pascalle.smith@cea.fr
tascou	riadh	ESHECM	Hammamlif (Tunisie)	rtascou@yahoo.fr
thiebeau*	pascal	Agronomie Laon-Reims-Mons	REIMS	thiebeau@reims.inra.fr
valdés*	héctor	INRA- UMR SYSTEM	Montpellier	hector.valdes@cirad.fr
viavattene	christophe	CIG - ENSMP	FONTAINEBLEAU	christophe.viavattene@ensmp.fr
wallach*	daniel	ARCHE	castanet Tolosan Cedex	wallach@toulouse.inra.fr
weinzaepflen*	emmanuelle	Université de Liège	Arlon (Belgique)	eweinzaepflen@ulg.ac.be

Plan du site et des salles