



SEMINAIRE



**ARLES 23 et 24 Janvier 2003**

## Journée du 23 Janvier 2003

<b>Accueil</b>	<b>café</b>	<b>10h00 -10h30</b>
<b>Introduction</b>		
<b>N. Brisson</b>	<b>Bilan des activités du groupe STICS depuis la dernière réunion</b>	<b>10h30 -10h45</b>
<b>P. Bertuzzi</b>	<b>Le mot du département Environnement et Agronomie</b>	<b>10h45 -10h50</b>
<b>J. Wery</b>	<b>Introduction aux modèles de culture</b>	<b>10h50 -11h10</b>
<b>Session 1 : Panorama des nouveautés de la dernière version (animée par Philippe Gate de l'ITCF)</b>		
<b>N. Brisson</b>	<b>Agrophysiologie</b>	<b>11h10 -11h30</b>
<b>B. Mary</b>	<b>Devenir de l'azote dans le système sol-plante</b>	<b>11h30 -11h50</b>
<b>J. Tournebize</b>	<b>Drainage et Excès d' eau dans STICS : formalisme et intégration</b>	<b>11h50 -12h10</b>
<b>S. Lebonvallet</b>	<b>Passage de STICS4 à STICS5 : illustration à partir d'une base de données cultures</b>	<b>12h10 -12h30</b>
	<b>Repas</b>	<b>12h40 -14h00</b>
<b>Session 2 : Stics culture et systèmes de culture (animée par Christian Dupraz de l'UMR System)</b>		
<b>E. Justes</b>	<b>Paramétrage et évaluation de STICS 5 pour un nouvelle culture (moutarde)</b>	<b>14h00 -14h20</b>
<b>C. Gary</b>	<b>Le point sur STICS-Vigne</b>	<b>14h20 -14h40</b>
<b>F. Gay</b>	<b>Adaptation de STICS à la culture de Laitue sous abri froid : application à la modélisation du drainage et comparaison avec le modèle PASTIS</b>	<b>14h40 -15h00</b>
<b>P. Debaeke</b>	<b>Quelles options pour une prise en compte des bio-agresseurs dans STICS ?</b>	<b>15h00 -15h20</b>
<b>R. Tournebize</b>	<b>Stics et les cultures de bananes associées</b>	<b>15h20 -15h40</b>
	<b>Présentation des posters par l'animateur</b>	<b>15h40 -15h50</b>
	<b>Pause café et posters</b>	<b>15h50 -17h10</b>
<b>Session 3 : STICS environnement (animée par Jacques Granier du CEMAGREF)</b>		
<b>Sierra et al.</b>	<b>Modélisation de la minéralisation, la nitrification et le transfert des nitrates dans les sols tropicaux acides</b>	<b>17h10 -17h30</b>

J.E. Delphin	Lessivage des nitrates sous sol nu : comparaison des estimations STICS avec les teneurs dans la solution du sol à 3 niveaux	17h30 -17h50
S. Juin et N. Brisson	Impact des changements climatiques sur les cultures fourragères en moyenne montagne	17h50 -18h10
V. Houllès	Évaluation de STICS vis à vis d'un critère agroenvironnemental sur des essais doses d'azote : vers son utilisation pour le raisonnement de la fertilisation azotée.	18h10 -18h30
Mailhol et al.	Calage et validation de STICS sur maïs irrigué en aspersion et tentative d'utilisation en irrigation gravitaire	18h30 -18h50
P. Debaeke	Contribution de STICS à l'évaluation de conduites de culture en conditions d'eau limitée	18h50 -19h10
	Présentation des posters par l'animateur	19h10 -19h20
20 h apéritif et dîner		
<b>Journée du 24 Janvier 2003</b>		
<b>Session 4 : Mode d'utilisation du modèle et outils (animée par Frédéric Levrault d'Agrotransfert Poitou-Charentes)</b>		
Justes et Dorsainvil	Test de scénarios de cultures intermédiaires	8h10 - 8h30
Gaudillère	Utilisation de STICS pour tester des scénarios de conduite de la vigne	8h30 - 8h50
F. Levrault	2002 : année de restrictions pour l'irrigation du maïs en Poitou-Charentes. Quels impacts à l'échelle du bassin - versant ? Des réponses avec STICS-COGITO.	8h50 - 9h10
J.Ph Denux	Intégration de données satellitales multitemporelles pour le forçage de STICS. Application à la culture du maïs dans le cadre de l'agriculture de précision	9h10 -9h30
Pause café		
F. Flenet	Adaptation de STICS au lin graine : démarche et résultats	10h00 -10h20
F. Ruget	Analyse de sensibilité de STICS : principe et résultats	10h20 -10h40
D. Wallach	BAO-MdC : une boîte à outils pour appliquer, paramétrer et évaluer des modèles de culture	10h40 -11h00
	Présentation des posters par l'animateur	11h00 -11h10
	Séance posters	11h10 -12h00
Repas		

<b>Session 5 : Couplage avec d'autres modèles et spatialisation (animée par Gérard Dedieu du CESBIO)</b>		
<b>Di Bella et al.</b>	<b>Utilisation de données satellitaires couplées à STICS pour l'évaluation de la production des prairies à l'échelle nationale</b>	<b>13h10 -13h30</b>
<b>Poupa</b>	<b>Cstics : traducteur pour le couplage informatique de STICS avec des modèles extrinsèques</b>	<b>13h30 -13h50</b>
<b>Dupraz et Lecomte</b>	<b>Modélisation des interactions arbre-culture par couplage de STICS à un modèle arbre spatialisé 3D : principe et architecture informatique</b>	<b>13h50 -14h10</b>
<b>Gervois</b>	<b>Zones agricoles et climat : vers une meilleure prise en compte de ces régions dans les modèles globaux</b>	<b>14h10-14h30</b>
	<b>Présentation des posters par l'animateur</b>	<b>14h30 -14h50</b>
<b>Pause café et posters</b>		
		<b>14h50 -15h10</b>
<b>Gomez</b>	<b>Modélisation intégrée du transfert de nitrate sur le bassin de la Seine</b>	<b>15h10 -15h30</b>
<b>Schnebelen</b>	<b>Utilisation spatialisée du modèle agronomique Stics pour évaluer l'impact de modifications de pratiques agricoles sur le lessivage de nitrates d'un site expérimental en Petite Beauce</b>	<b>15h30 -15h50</b>
<b>Guerif</b>	<b>Utilisation spatialisée de STICS dans le cadre de l'agriculture de précision : assimilation de données issues de la télédétection</b>	<b>15h50- 16h10</b>
<b>Zanolin</b>	<b>Spatialisation de STICS à l'échelle de la parcelle en vue d'une irrigation de précision</b>	<b>16h10 -16h30</b>
<b>C. Bailly et B. Seguin</b>	<b>Conclusions</b>	<b>16h30 -16h50</b>

## Sommaire

<i>Introduction</i>	8
Concepts et formalismes des modèles de culture	9
<i>Session 1</i>	13
<i>Panorama des nouveautés de la dernière version</i>	13
Nouveautés agrophysiologiques dans STICS5	14
Drainage et excès d'eau dans STICS v.5 : formalismes et intégration	18
Passage de STICS4 à STICS5 : mise à jour du paramétrage plante et illustration à partir d'une base de données cultures	23
<i>Session 2</i>	25
<i>Stics culture et systèmes de culture</i>	25
Adaptation de STICS à la culture de Laitue sous abri froid : application à la modélisation du drainage et comparaison avec le modèle PASTIS.	26
Paramétrage de STICS v.5 pour une nouvelle culture : essai de contribution à la réflexion méthodologique. L'exemple de la moutarde blanche utilisée comme culture intermédiaire.	31
Modélisation d'une espèce ligneuse pérenne à fruits charnus : la vigne	36
Stics et les cultures de bananes associées	38
Vers une modélisation de la nuisibilité quantitative et qualitative des maladies aériennes du blé en interaction avec les facteurs de production	42
Adaptation of the model STICS to intercropping and Agroforestry systems	47
Elements pour le paramétrage du module levée de STICS et de l'allongement racinaire	50
Étalonnage du modèle STICS pour une culture de blé en condition semi-aride (Vallée de Yaqui, Nord-Mexique)	51
STICS et Mauvaises Herbes : Quel avenir commun ?	55
Fonctionnement physiologique de la canne à sucre et concepts du modèle STICS.	59
Utilisation de Stics pour les cultures de bananes associées ; acquis et besoin	61
Modélisation des relations entre ressources azotées et croissance et développement d'une espèce indéterminée : EXEMPLE DE LA TOMATE D'INDUSTRIE AU CHILI.	64
<i>Session 3</i>	67
<i>Stics environnement</i>	67
Apport de STICS à l'évaluation de scénarios de conduite de culture en conditions d'eau limitée	68
Lessivage des nitrates sous sol nu : comparaison des estimations STICS avec les teneurs dans la solution du sol à 3 niveaux.	72
Influence du changement climatique sur la répartition géographique et les calendriers de production de trois systèmes fourragers en zone de moyenne montagne	76
Évaluation de STICS vis à vis d'un critère agro-environnemental sur des essais doses d'azote : vers son utilisation pour le raisonnement de la fertilisation azotée	79

Utilisation du modèle Stics dans le contexte des sols limoneux profonds du site de Lavalette (Montpellier) sur maïs irrigué en aspersion et à la raie. _____	83
Modélisation de la minéralisation, la nitrification et le transfert des nitrates dans les sols tropicaux acides _____	87
About the crop temperature as simulated by the STICS model _____	90
Simulation du microclimat dans STICS en vue de l'interfaçage avec un modèle épidémiologique : exemple du couple tournesol-phomopsis _____	92
Impact du rechauffement climatique sur la phénologie des arbres fruitiers dans la vallée du Rhône _____	96
Impacts des changements climatiques sur la qualité du blé dur _____	98
Risque environnemental en culture de laitue sous abri _____	102
<i>Session 4</i> _____	<i>107</i>
<i>Mode d'utilisation du modèle et outils</i> _____	<i>107</i>
Adaptation de STICS au lin graine : démarche et résultats _____	108
Tests du modèle STICS vigne _____	113
Simulation et analyse de scénarios de modes de conduite de cultures intermédiaires pièges à nitrate avec le modèle STICS. _____	114
"2002 : année de restrictions pour l'irrigation du maïs en Poitou-Charentes. Quels impacts à l'échelle du bassin ó versant ? _____	118
Intégration de données satellitaires multitemporelles pour le forçage de STICS. Application à la culture du maïs dans le cadre de l'agriculture de précision. _____	122
BAO-MdC. Une boîte à outils pour appliquer, paramétrer et évaluer des modèles de cultures _____	124
Sensibilité de STICS 4 aux fonctions de pédotransfert (FTP) Simulation du rendement en parcelle hétérogène _____	127
Forçage du Modèle STICS par l'NDICE FOLIAIRE application à la télédétection _____	128
Méthodologie d'identification de la qualité du blé dur _____	131
Episticks, un modèle pour générer des calendriers de fertilisation et d'irrigation en arboriculture fruitière _____	136
Analyse de sensibilité de STICS : principe et résultats _____	139
Estimation des paramètres des modèles de culture _____	142
<i>Session 5</i> _____	<i>150</i>
<i>Couplage avec d'autres modèles et spatialisation</i> _____	<i>150</i>
Utilisation de données satellitaires couplées à un modèle de fonctionnement pour l'évaluation de la production prairiale à l'échelle nationale _____	151
Modélisation des interactions arbre-culture par couplage de STICS à un modèle arbre spatialisé 3D : principe et architecture informatique _____	156
Zones Agricoles et Climat: vers une meilleure prise en compte de ces régions dans les modèles globaux _____	160
Modélisation intégrée du transfert de nitrate sur le bassin de la Seine _____	161
Utilisation de modèles de culture pour l'aide à la décision dans le cadre de l'agriculture de précision : spatialisation grâce à l'assimilation de données de télédétection _____	162

<b>Cstics : Couplage informatique de STICS avec des modèles extrinsèques</b>	<b>166</b>
<b>Utilisation spatialisée de STICS pour évaluer l'impact de modifications de pratiques agricoles sur le lessivage de nitrates d'un site expérimental en Petite Beauce</b>	<b>170</b>
<b>Spatialisation de STICS à l'échelle de la parcelle en vue d'une irrigation de précision</b>	<b>174</b>
<b>Intégration de STICS avec les systèmes d'information géographique, développement d'une interface pour le traitement de données spatiales.</b>	<b>178</b>
<b>Utilisation d'une série de données SPOT-HRV pour la paramétrisation du modèle STICS : Application à la spatialisation du bilan hydrique en condition semi-aride (Plaine du Tensift, Maroc).</b>	<b>179</b>
<b>Assimilation de données économiques par STICS pour l'enrichissement du modèle économique AROPAj</b>	<b>185</b>
<b>Validation des estimations régionales de la production des prairies en France faites à partir de STICS et d'une base de données caractérisant les conditions régionales de production.</b>	<b>188</b>
<b><i>BIBLIO</i></b>	<b><i>190</i></b>
<b><i>Liste des participants</i></b>	<b><i>200</i></b>

# Introduction



# Concepts et formalismes des modèles de culture<sup>1</sup>

Nadine Brisson<sup>1</sup>, Jacques Wery<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unité Climat, Sol et Environnement INRA Avignon

<sup>2</sup> UMR System ENSAM-INRA-CIRAD Montpellier

Les modèles de culture représentent le fonctionnement dynamique du système sol-plante en interaction avec le climat et les pratiques agricoles. L'unité spatiale de simulation correspond à une situation homogène en termes de sol, de climat et d'itinéraire technique. C'est traditionnellement la parcelle d'agriculteur, mais cela peut aussi être un sous-ensemble supposé homogène (cas en agriculture de précision). En conséquence, les paramètres et variables d'état du système sont des moyennes ou des médianes (pas de caractère probabiliste). La plupart des concepts utilisés par la suite découlent de cette hypothèse (développement, LAI en particulier).

Il s'agit de modèles à compartiments reliés entre eux par des flux de matière dépendant d'un pilotage énergétique et des flux d'information. Pour le système plante, le flux de matière correspond au carbone, avec un pilotage énergétique de type radiatif. Pour le sol le pilotage énergétique est de type hydraulique et thermique et les flux de matière correspondent au minimum à l'eau, l'azote minéral et la matière organique. Le développement et les stress agissent sous la forme d'informations qui orientent le fonctionnement du système. Les stress (le plus souvent de type abiotique) sont des fonctions de réduction de l'activité de la plante commandées par des variables de stress (fraction d'eau transpirable, indice de nutrition azoté, température, fraction du système racinaire ennoyé,  $\tau$ ). Le calcul de la variable de stress repose sur des modules annexes : bilans hydrique et azoté en particulier.

L'ensemble des concepts intégrés dans les modèles de culture correspond à une représentation implicite du système sol-plante, en termes de structure et de fonctionnement. Cette représentation est la conséquence d'un « point de vue » adopté sur le système en fonction des objectifs d'utilisation du modèle. Ce n'est pas l'état des connaissances sur le fonctionnement du sol ou de la plante, mais une synthèse de ces connaissances sous des formes simplifiées, analogiques s'appuyant sur une hiérarchisation implicite de l'importance des mécanismes en vue de l'objectif affiché. Parmi ces concepts, on a choisi les plus utilisés.

## 1. Le développement

La température pilote le développement grâce à l'échelle de temps physiologique toujours basée sur la notion de somme de degrés.jour. Cette notion ancienne repose sur une approximation linéaire de la courbe de réponse de la vitesse de développement à la température. Ainsi, en toute rigueur, la température de base correspond à une valeur statistique et non physiologique. C'est la température moyenne journalière qui est utilisée et les autres facteurs affectant la vitesse de développement sont modélisés comme des freins ou des accélérateurs de la vitesse en temps thermique. Il s'agit de la photopériode, des besoins en froid ou des stress. Il est à noter que l'effet négatif possible de températures supra-optimales n'est pas pris en compte. Par ailleurs, même s'il est plus commode d'utiliser les températures sous abri mesurées dans les réseaux météorologiques, il peut être plus intéressant de se rapprocher de la température réellement perçue par les plantes.

---

<sup>1</sup> Extrait d'un texte plus complet, présenté à l'Ecole Chercheur Modélisation Le Croisic le 14-19 octobre 2002

## 2. La dynamique du LAI

La canopée est assimilée à un milieu homogène, ce qui se traduit par la représentation du feuillage comme une seule grande feuille de surface équivalente. Une conséquence évidente de cette représentation est que le modèle simule une plante « moyenne ». Elle permet d'utiliser une analogie optique (loi de Beer) pour estimer l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Cette approche est très performante pour les cultures homogènes, mais elle est mal adaptée aux couverts en rang ou dans la phase d'installation de la culture.

La surface spécifique (rapport entre surface et masse foliaire) est un autre concept souvent utilisé dans les modèles de culture. Il sert à convertir la croissance en biomasse affectée aux feuilles en croissance en surface et suppose donc qu'une partie des assimilats soit allouée aux feuilles. Cette approche offre l'avantage d'intégrer une partie des stress (ceux qui agissent sur la biomasse) dans le contrôle de la croissance foliaire et à ce titre reproduit l'autorégulation de la plante. Cependant, la surface spécifique ne peut être considérée comme constante car elle est affectée par l'âge de la culture et les stress. Par ailleurs le calcul de la croissance foliaire ainsi réalisé est itératif et donc très sensible à l'initialisation (LAI au départ). Une alternative à l'utilisation du SLA consiste à piloter la croissance foliaire par la température. La sénescence foliaire est abordée de diverses façons : utilisation de la durée de vie, proportion prédéfinie de la biomasse ou fonction du statut azoté de la culture.

Les stress agissent sur le feuillage, de façon toujours plus sévère que sur la biomasse ; et donc, pour les approches par SLA, l'effet du stress sur la biomasse ne suffit pas à représenter la réduction foliaire en cas de stress. Ainsi, le stress hydrique et azoté réduit la croissance foliaire et/ou accélère la sénescence.

## 3. L'accumulation de biomasse

La relation linéaire entre la biomasse accumulée dans la plante et le rayonnement intercepté par le feuillage mise en évidence par Monteith (1972) définit l'efficacité de conversion (ou RUE pour « Radiation Use Efficiency ») comme la pente de cette relation. Ce paramètre est devenu un concept largement utilisé dans les modèles de culture car il synthétise, de façon très économe en nombre de paramètres, les processus de photosynthèse, de respiration, ainsi que la variation de composition de la biomasse selon les organes et la période du cycle. Son mode de calcul (rapport entre biomasse aérienne et rayonnement absorbé) implique que ce paramètre prend aussi implicitement en compte un coefficient d'allocation du carbone entre parties aériennes parties souterraines. Evidemment, à cause des bases physiologiques sous-jacentes, cette grandeur varie avec les stress, la température et la phénologie. Pour tenir compte de ces effets, Sinclair a proposé de considérer RUE comme une fonction physiologique en lui appliquant les indices de stress.

L'efficacité de la transpiration (ou WUE : Water Use Efficiency) est un autre paramètre synthétique parfois utilisé pour estimer la biomasse accumulée. Cette approche s'appuie sur le fonctionnement stomatique et doit tenir compte de l'état d'humidité de l'atmosphère. Elle est bien adaptée aux conditions sèches mais pose deux problèmes : l'intégration du stress azoté et la sensibilité à l'estimation de la transpiration reposant sur le module de bilan hydrique. Par l'intermédiaire de la transpiration, cette approche intègre implicitement le pilotage radiatif.

Les facteurs limitant de l'accumulation de biomasse sont multiples : température, eau et azote dans tous les modèles, effets du CO<sub>2</sub> dans quelques uns.

#### 4. L'élaboration dynamique du rendement

Le rendement et le nombre d'organes récoltés sont généralement calculés indépendamment (jusqu'à atteindre le potentiel variétal) ; le poids élémentaire de ces organes en est la résultante.

C'est en 1972 que Warren-Wilson propose de considérer la plante comme un ensemble de compartiments jouant un rôle de source ou de puits vis à vis des assimilats. Ces compartiments correspondent le plus souvent à des organes qui peuvent changer de fonction au cours du cycle. L'application de ce concept dans les modèles de culture engendre une autorégulation du système entre la croissance des différents types d'organes. Il est particulièrement adapté aux cultures à croissance indéterminée et aux cultures pérennes, pour lesquelles existe une compétition trophique entre les organes végétatifs et les organes de stockage. Les sources comprennent à la fois les assimilats néoformés et les remobilisations. La force des puits est le plus souvent représentée par une fonction continue ou discrète de l'âge de l'organe. Les difficultés de cette approche résident dans le dimensionnement de la force des puits et des remobilisations, difficile à estimer expérimentalement. Une alternative est d'imposer une répartition constante des assimilats par phase phénologique .

Une seconde alternative, proposée par Spaeth et Sinclair (1985) consiste à étendre la notion d'indice de récolte final à l'accumulation dynamique de biomasse dans les grains et à en proposer une expression simple. Cette approche présente l'avantage de globaliser les deux sources d'assimilats et est économe en paramètres. Cependant, il est important de seuiller cette dynamique pour éviter de simuler des remobilisations irréalistes ou de dépasser le remplissage maximal autorisé par le nombre d'organes (généralement fixé avant) et le poids maximal d'un organe (de nature variétale).

#### 5. Le bilan hydrique

L'objectif du bilan hydrique des modèles de culture est double : estimer la teneur en eau du sol (qui pilote par exemple la minéralisation de l'azote du sol) et les indices de stress hydrique (qui pilotent le fonctionnement de la plante). Ce second objectif le différencie des modèles dédiés au pilotage de l'irrigation et impose une séparation entre évaporation et transpiration.

Cette séparation est généralement appliquée au niveau de la demande climatique, selon une analogie optique (loi de Beer). Cette approche repose sur l'estimation d'une composante climatique et d'une composante culturale, qui est, le plus souvent, reliée au LAI ou aux stades de développement. La convection sous le couvert végétal, qui joue sur la transpiration maximale, peut être mal reproduite par cette analogie optique (en particulier pour les couverts en rang) ; ce qui peut justifier le recours à un calcul de bilan énergétique.

Pour calculer l'eau réellement transpirée par la culture, la plupart des modèles s'appuient sur une grandeur qui intègre la quantité d'eau physiquement disponible dans le sol et la capacité de la plante à extraire cette eau compte-tenu de ses caractéristiques racinaires. Il s'agit de la fraction d'eau transpirable correspondant aussi à la notion plus familière de réserve utile racinaire, R/RU. Cette approche ne permet pas de localiser précisément l'absorption racinaire dans le profil de sol (au pas de temps journalier, tous les modèles font l'hypothèse transpiration = absorption), mais présente l'avantage de tenir compte implicitement des remontées capillaires à l'intérieur de la zone colonisée par les racines. Cependant, le seuil de sensibilité peut varier dans le temps (croissance racinaire en densité, demande climatique).

Cette approche, développée au départ pour la régulation de la transpiration, a été ensuite extrapolée au calcul des fonctions de stress hydrique pour la croissance foliaire ou la RUE.

## 6. Le bilan azoté

Les besoins en azote dépendent de l'accumulation de biomasse, ce qui génère une liaison intime entre les dynamiques du carbone et de l'azote dans la plante. La courbe d'accumulation maximale d'azote définit les besoins. La courbe critique définit la limite supérieure de concentration en azote en dessous de laquelle la plante est en situation de carence et limite sa croissance. Elle permet de définir l'indice de nutrition azoté (ou INN) qui joue le rôle de variable d'état de stress azoté dans les modèles. Par construction, les rétro-actions du stress azoté (modération du stress azoté par ralentissement de la croissance) sont incorporées dans l'estimation de l'INN. La présence d'organes reproducteurs peut perturber la relation et il peut devenir inapproprié d'utiliser ces relations en phase de remobilisation importante de l'azote. L'absorption réelle tient compte de deux processus : la diffusion-convection de l'azote dans le sol et l'absorption par les racines.

Dans le sol, l'azote minéral (N-NO<sub>3</sub> et N-NH<sub>4</sub>) disponible pour la plante provient de la fertilisation et de la minéralisation de la matière organique. Cette dernière est représentée par des compartiments (ou pools) caractérisés par leur vitesse de production d'azote minéral. Les trois pools les plus fréquemment identifiés sont l'humus (compartiment le plus stable de la matière organique), la biomasse vivante du sol (micro-organismes actifs sur la minéralisation) et les résidus apportés au sol régulièrement par l'agriculteur. Le sol intervient dans ces transformations par ses caractéristiques permanentes (argile et calcaire) qui fixent un potentiel de minéralisation et son état physique (température et humidité) qui le réduit. L'azote minéral produit alimente un pool unique dans lequel puise la plante.

### Conclusion

Les modèles de culture sont une représentation du système sol-culture avec un cadre conceptuel robuste pour les cultures herbacées annuelles. Cette robustesse a été mise à l'épreuve depuis 25 ans sur de nombreuses espèces et dans de nombreuses conditions pédo-climatiques. Cependant, ce cadre peut devenir rigide et contraignant (plante moyenne, notions de stress) pour certaines utilisations. D'autres types de modèles ont donc été développés par les agronomes pour ces utilisations mais ils ne peuvent pas être considérés comme des modèles de culture, tels que nous les avons définis dans cet exposé.

### Référence principale

Brisson, N., Wery, J. Introduction aux modèles de culture. 2002, Ecole Chercheur « Pour une bonne utilisation des modèles de culture », Le Croisic, 2002/10/14-18

## Session 1

Panorama des nouveautés de la  
dernière version

Animateur : Philippe Gate

## Nouveautés agrophysiologiques dans STICS5

Nadine Brisson

Unité Climat, Sol et Environnement - INRA 684 914 Avignon France

### Introduction

Le caractère générique de STICS a été renforcé dans la version 5. Il est potentiellement adaptable à de nombreuses cultures (annuelles, pérennes, herbacées, ligneuses, cultures industrielles, maraîchage, arboriculture, viticulture) et fonctionne actuellement pour une vingtaine d'entre elles. Cela nous a conduit à faire des choix de formalismes sur la base d'études comparatives en terme d'agrophysiologie (écophysiologie en interaction avec les pratiques) révélant des typologies de culture. Cette genericité fonctionnelle est, le plus souvent, le fruit de travaux spécifiques (thèse, DEA en particulier). L'objectif de cet exposé est d'expliquer les principales innovations de la version 5, décrites dans la notice des formalismes.

### 1. Le développement

Le début de la saison de végétation peut commencer par la germination, la plantation ou l'apparition de nouveaux bourgeons ou feuilles après le repos hivernal selon qu'il s'agit d'annuelles ou de pérennes. Un sol sec retarde la germination et l'élongation des hypocotyles selon une loi linéaire entre le point de flétrissement permanent et la capacité au champ. Cette loi, pondérée par la sensibilité du système racinaire à la sécheresse du sol, est également active sur toutes les fonctions de croissance racinaire. Des manques à la levée sont simulés si le temps écoulé depuis la germination est trop long ou si des températures gélives apparaissent au stade plantule (défini par un nombre de feuilles). A l'instar de la vernalisation des plantes herbacées, les phénomènes liés à la dormance des ligneux sont à présent simulables dans STICS (modèles de Bidabe ou Richardson). Par ailleurs des stress précoces (jusqu'au début de fructification), aussi bien hydriques qu'azotés, peuvent provoquer des retards de développement

### 2. L'indice foliaire

Pour le calcul de l'indice foliaire, le bilan entre croissance et sénescence naturelle peut être implicite (simulation directe du LAInet de la version 4) ou explicite. La sénescence est simulée en utilisant le concept de « durée de vie foliaire », qui peut être réduite (voire annulée en cas de gel) par les stress ou augmentée par un état azoté excédentaire. Il existe un seuil de LAI à partir duquel débute la compétition interplante au sein du peuplement.

Une alternative simple au calcul du LAI est proposée: c'est le calcul direct du taux de couverture du sol par une loi logistique fonction du développement, qui participe ensuite aux calculs d'interception du rayonnement et de besoins en eau. Les indices de stress interviennent également.

Pendant la maturation des organes de stockage, le fonctionnement chlorophyllien des enveloppes (épi de blé, siliques de colza) peut induire une accumulation significative de biomasse ; ce qui est simulé en introduisant un équivalent foliaire de ces enveloppes.

Des pratiques de régulation du LAI, tel le rognage et l'effeuillage sont simulables.

### 3. Les indices de stress

Les indices de stress traduisent l'action des facteurs limitants, qui sont plus nombreux que dans la version 4 : déficit hydrique, carence azotée, excès d'eau, gel et températures excessives, compétition trophique (pour les plantes à croissance indéterminée). De plus, pour chacun des facteurs limitants, il existe plusieurs indices de stress afin de reproduire la sensibilité différentielle entre les fonctions physiologiques. Par exemple, l'élongation foliaire est toujours la première fonction affectée par les stress. Quand on suppose qu'il existe des interactions entre ces stress, c'est le minimum qui est retenu ; dans le cas inverse, ils sont simplement multipliés.

### 4. La croissance aérienne totale

Pour l'interception du rayonnement des cultures en rang, il est recommandé d'activer le module de transferts radiatifs (alternative à la loi de Beer), qui repose sur une description simple de la géométrie du végétal et sur une densité foliaire, dans la forme décrite, qui peut augmenter (elle était fixe dans la version 4) pour simuler une densification du feuillage.

Dans le cas des cultures pérennes, des réserves hivernales sont remobilisées pour le démarrage printanier ; elles sont reconstituées en fin de cycle végétatif. Pour l'ensemble des cultures, des réserves peuvent également se constituer au cours du cycle, puis être réutilisées un peu plus tard. En fait ce compartiment de réserve, non identifié en terme d'organe, est calculé comme le complémentaire entre la biomasse totale et le cumul des biomasses des feuilles (LAI + feuilles sénescentes convertis en biomasse), des tiges (utilisation du rapport tige/feuille) et des organes récoltés.

L'effet de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère est pris en compte. Il augmente l'efficacité de conversion et la résistance stomatique (actif dans l'option « modèle résistif » du module hydrique), induisant en bilan une augmentation de l'efficacité de l'eau.

### 5. Les composantes du rendement

Les paramètres déterminant le nombre maximal d'organes, leur poids maximal et leur durée de remplissage sont variétaux, pour les deux types de croissance (déterminée et indéterminée). Le gel et l'indice de nutrition azoté peuvent directement agir sur le nombre d'organes. Ceux-ci peuvent être organisés en inflorescence (cas de la vigne) et être soumis à des pratiques d'éclaircissage.

La qualité de la récolte est abordée très simplement, par une décomposition en familles biochimiques : teneur en eau, sucre, azote et huile. La teneur en eau est simulée à partir d'un stade précis au cours de la maturation, en supposant que deux processus se superposent : une évolution « programmée » de la teneur en eau des fruits (hydratation ou déshydratation) et

une déshydratation induite par le stress hydrique (exprimée dans le modèle en fonction de l'écart entre les températures de culture et d'air). La teneur en azote est simulée par le concept d'indice de récolte étendu à l'azote. Pour le sucre et l'huile, on suppose que les teneurs sont proportionnelles à la biomasse.

La possibilité de simuler la qualité, nous a permis d'envisager divers critères de récolte, relativisant ainsi la notion de maturité.

## **6. La croissance racinaire**

L'humidité et la densité du sol agissent, désormais, sur les deux composantes de la croissance racinaire (profondeur et densité). La notion de sensibilité des racines à la sécheresse permet de moduler la notion de point de flétrissement, considérée comme une caractéristique permanente du sol. Une densité apparente trop faible peut avoir un effet négatif par manque de cohésion. L'anoxie agit également sur les deux composantes, en liaison, aussi, avec un paramètre de sensibilité.

## **7. L'absorption d'azote**

Pour les plantes fixatrices, en plus de l'option très simple de la version 4 qui consiste à supposer que la fixation assure une nutrition azotée au niveau de la courbe critique, il existe un module simulant l'activité des nodosités, qui tient compte de facteurs limitants tels que l'eau et l'azote.

En ce qui concerne la demande en azote pendant la phase de stockage, si la demande liée aux organes végétatifs continue d'obéir à la courbe de dilution maximale, la demande liée aux organes de stockage dépend, désormais, de l'état azoté de la culture. A l'extrême, si l'ANN de la culture est grand, cette demande peut être nulle.

## **8. Le microclimat**

Dans la simulation du microclimat du couvert, c'est à dire de sa température et de son humidité (à un niveau moyen représentatif du couvert), diverses améliorations ont été introduites. La principale étant le calcul itératif de la température de culture permettant de prendre en compte son action sur le rayonnement net et sur le flux de chaleur. Pour un couplage éventuel avec des modèles phytosanitaires, une reconstitution horaire de ces variables d'état est proposée (sur la base de calculs astronomiques de durée du jour) et stockée dans un fichier de sortie.

Pour les cultures maraîchères sous abri froid, il est possible d'estimer le climat sous l'abri, connaissant les caractéristiques de la couverture et la proportion d'ouvrants. Parmi les hypothèses simplificatrices adoptées, on suppose que la différence de température moyenne avec l'air extérieur s'applique en totalité à la température maximale, la température minimale étant identifiée à celle de l'extérieure.

## **Conclusion**



L'ensemble des nouveautés de la version 5 confère à STICS un réel caractère générique. Cependant l'augmentation du nombre d'options et les interactions entre ces nombreux processus rendent parfois complexe l'interprétation des résultats et le diagnostic sur le fonctionnement du modèle. Il est à présent important de consolider cette version 5 en la confrontant à la réalité pour fournir des jeux de paramètres robustes.

Brisson N. et Mary B, 2002. STICS 5.0 : Notice concepts et formalismes. 85 pp.

## Drainage et excès d'eau dans STICS v.5 : formalismes et intégration

par

N. de Louvigny, N. Nikolic, J. Tournebize, N. Brisson, C. Kao, D. Zimmer

Beaucoup de sols peu profonds souffrent d'un excès d'eau temporaire, dû à l'accumulation de l'eau de pluie infiltrée au-dessus d'une couche peu imperméable. Ces excès d'eau sont très souvent présents de la fin de l'automne jusqu'au début du printemps et se révèle être une contrainte pour la majeure partie des exploitations agricoles. Ainsi, afin d'améliorer le rendement des sols cultivés et notamment ceux des parcelles de blé d'hiver, des systèmes drainants (généralement en PVC) ont été installés à une profondeur de 80 cm environ, pour un écartement de drains de 10 m.

D'un point de vue plus agronomique, des fonctions stress liées à l'engorgement du sol ont été déterminées pour une culture de blé d'hiver et intégrées dans un outil prédécesseur de STICS. Un couplage avec un modèle de drainage a ensuite été réalisé (Rebière 1996). L'intégration des résultats de ce travail dans la plate-forme STICS a démarré en 2000 : la composante transferts d'eau en terrains drainés (Nikolic et al. 2000) et une partie des fonctions stress (développement racinaire) ont été incorporées. Cette intégration se poursuit pour ce qui concerne : (i) les autres fonctions stress liées au développement des parties aériennes, (ii) les transferts de nitrates en terrains drainés (résultats de la thèse de (Arlot 1999)). Le formalisme utilisé pour les terrains drainants peut s'appliquer à la majeure partie des terrains à nappe superficielle même en l'absence de drainage souterrain ; il existe en effet toujours un drain naturel pour ces terrains. Ce travail est calé sur les données de hauteur de nappe et de profondeur racinaire obtenues par Bernard Rebière (Arrou, 1993-94) et validé sur des jeux de données de La Jallière (44) et d'Arrou (28).

### 1- Incorporations des modules dans STICS

#### Incorporation du module de drainage

Le module de drainage repose sur la base du modèle SIDRA (SIMulation du DRAINage (Lesaffre et Zimmer 1988)). Il a été introduit dans STICS sous sa version simplifiée, en ne tenant compte que du cas où le drain reposait sur l'imperméable. SIDRA utilise la recharge nette de la nappe à chaque pas de temps afin d'en déduire les variations de hauteur de nappe à l'interdrain et de calculer le débit au drain. La recharge nette est définie comme étant la différence entre la pluie brute et la demande évaporative.

Le couplage entre SIDRA et STICS s'est effectué sous 2 aspects : un couplage dimensionnel (passage du bidimensionnel de SIDRA à l'unidimensionnel de STICS) et un couplage temporel (passage du pas de temps horaire de SIDRA au pas de temps journalier de STICS). Pour le dimensionnel, la hauteur de la nappe « à l'interdrain dans STICS » ( $H$ ) a été estimée à partir de la hauteur de nappe moyenne calculée dans le profil de sol ( $H_{moy}$ ) en intégrant le paramètre  $B$ , coefficient de forme de nappe tel que :

$$H_{moy} = H/B$$

#### La quantité d'eau contenue dans la macroporosité du sol a été exprimée en hauteur d'eau moyenne dans le profil.

Le couplage temporel s'est effectué en tenant compte de certaines hypothèses : la porosité de drainage du sol ( $\mu$ ) a été supposée égale à la macroporosité de STICS, la présence d'un horizon imperméable à la base du profil de sol a été pris en compte en fixant le paramètre d'infiltrabilité du dernier horizon dans STICS à une valeur nulle ou faible, et la recharge nette

journalière calculée par STICS a été utilisée pour le calcul des débits drainés. L'expression simplifiée du drainage intégrée dans STICS prend la forme suivante :

$$Q = J(H) = \frac{K \cdot H_{\max}^2}{L^2}$$

Cette expression présente l'avantage de n'utiliser que très peu de paramètres (K,  $\mu$ ) en plus de la définition simplifiée du système (profondeur de l'imperméable, position des drains), associés à l'évaluation de la recharge nette déterminée par STICS.

### Intégration de la sensibilité à l'anoxie

La sensibilité de la plante à l'anoxie a été introduite dans STICS à partir des travaux de (Rebière 1996). Il s'agit d'introduire une fonction de stress à l'excès d'eau, qui aura pour effet de stopper l'enracinement dès que les racines sont en présence de la nappe. Les travaux de B. Rebière (1996) ont montré que la meilleure expression pour cette variable était de prendre en compte le pourcentage de racines efficaces ennoyées (SEE), calculé sur deux jours. La proportion de racines ennoyées est calculée comme étant le rapport entre la quantité efficace de racines se trouvant dans les couches de sol saturées sur la quantité totale de racines. La limitation de la croissance des racines en profondeur et en densité efficace se fait par l'intermédiaire du calcul de l'indice de stress à l'excès d'eau sur les racines izrac :

$$izrac = \alpha * e^{(-\beta * SEE)} + C$$

C= -0.60 est une constante.

$\alpha = 1.60$ ,  $\beta = -0.27$  sont des coefficients calés par Rebière (1996) obtenus sur les données expérimentales d'une parcelle cultivée de blé d'hiver (variété Soisson) sur le site d'Arrou (28), en 1993-1994.

La présence de la nappe va stopper la progression des racines dans le sol, ce qui va entraîner une moindre croissance des parties aériennes (la biomasse, l'indice de surface foliaire), le rendement. La variable de stress est prise en compte dans le calcul de l'activité photosynthétique, dans la transpiration de la plante via la régulation stomatique par l'intermédiaire du pourcentage de racines ennoyées.

### L'azote

Le sol de la parcelle drainée est généralement considéré comme un réservoir de soluté dans lequel les eaux de pluie se mélangent avec l'eau du sol. Notre objectif est de quantifier de façon simple et réaliste les flux exportés de soluté dans notre système monodimensionnel.

Les travaux de Arlot (1999) ont permis de spatialiser les contributions en lessivage des différents compartiments de la zone drainée et ainsi d'évaluer les temps de présence du soluté à différentes abscisses. Il a été montré que la zone contributive au lessivage correspond à celle du niveau de la nappe dans le profil. C'est pourquoi dans une première approche, nous avons assimilé le lessivage de l'azote dans la parcelle drainée à une exportation du soluté à la cote de la nappe

## 2- Résultats et discussion

La nouvelle version de STICS intégrant l'approche développée par Nikolic et al. (2000) pour le strict fonctionnement du drainage et la sensibilité à l'excès d'eau pour le module agronomique (Rebière 1996, Brisson et al., 2002) a été calée sur les données mesurées de hauteur de nappe et profondeur racinaire obtenues sur la parcelle 1 du site d'Arrou (28) en 1993-1994. Dans une première étape, le module de drainage a été validé sur le sol nu par

Nikolic et al. (2000). Il a montré que le modèle permettait de simuler les données mesurées de manière correcte, sauf en ce qui concerne les débits de pointe, ceci étant dû au changement de pas de temps entre le modèle SIDRA et STICS. Les événements printaniers sont souvent mal reproduit. Notons aussi que les influences du gel, de la neige ne sont pas intégrées.

Dans une seconde étape, nous testons le module de simulation des effets des excès d'eau sur la plante. Avec le jeu de données disponibles dans la thèse de B. Rebière (1996), c'est essentiellement la diminution de croissance racinaire lorsque le sol se trouve engorgé qui sert de validation. L'écartement des drains que l'on considère est de 10 m, pour une profondeur de l'imperméable de l'ordre de 80 cm.

Les premiers résultats montrent que pour un écartement de drains de 10 m, le modèle STICS permet de reproduire l'allure générale des variations de hauteurs de nappe données dans la thèse de B. Rebière (figure 1). Néanmoins les valeurs prédites par STICS sont un peu plus faibles et la nappe se tarit un peu plus rapidement.

En ce qui concerne les profondeurs racinaires, l'excès d'eau est parfaitement pris en compte puisque lorsque les racines se trouvent être en présence de la nappe elles arrêtent leur croissance pour ne la reprendre qu'une fois la hauteur de nappe plus faible. L'allure générale de l'enracinement globalement bien reproduite, même si on note un écart entre la simulation et les mesures est de l'ordre de 10 cm durant la période hivernale (Figure 1). Cet écart peut s'expliquer par les conditions de réalisation de la mesure en plein hiver qui se traduisent par une imprécision de la mesure, par des facteurs climatiques ponctuels que les données ne mentionneraient pas (fort débit de quelques heures entre deux mesures ponctuelles). Notons aussi que le modèle STICS ne prend pas en compte la zone de transition où se trouvent les racines entre l'horizon de sol saturé et non saturé.

La comparaison des données de profondeur racinaire et de rendements obtenus avec les simulations effectuées par le modèle STICS au drain et à l'interdrain montrent une bonne adéquation entre les valeurs (tableau 1). En effet que ce soit au drain ou à l'interdrain, l'écart entre les valeurs simulées et observées de profondeur racinaire est de 9% maximum. Quant au rendement, nous surestimons un peu sa valeur de l'ordre de 0.6 t/ha au drain et de 1 t/ha à l'interdrain ce qui représente une erreur de 19% au plus.

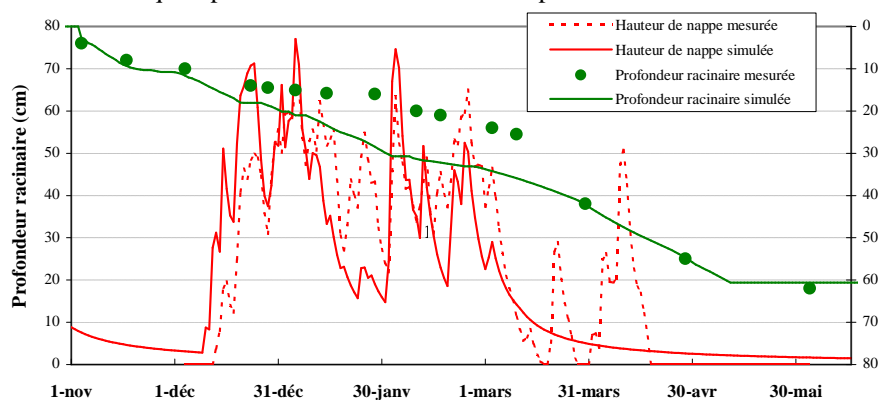


Figure 1 : Comparaison des hauteurs de nappe et profondeur racinaire à l'interdrain simulées par STICS avec celles mesurées par B. Rebière sur la parcelle 1 du site d'Arrou (28) en 1993-1994.

	Profondeur racinaire (cm)		Rendements (t/ha)	
	Drain	Interdrain	Drain	Interdrain
Mesure	72	62	6.61	5.59
Calage	65	61	7.29	6.66

Tableau 1 : Comparaisons des valeurs des profondeurs racinaires et des rendements au drain et à l'interdrain simulées par STICS avec celle obtenues par B. Rebière sur la parcelle 1 du site d'Arrou (28) en 1993-1994.

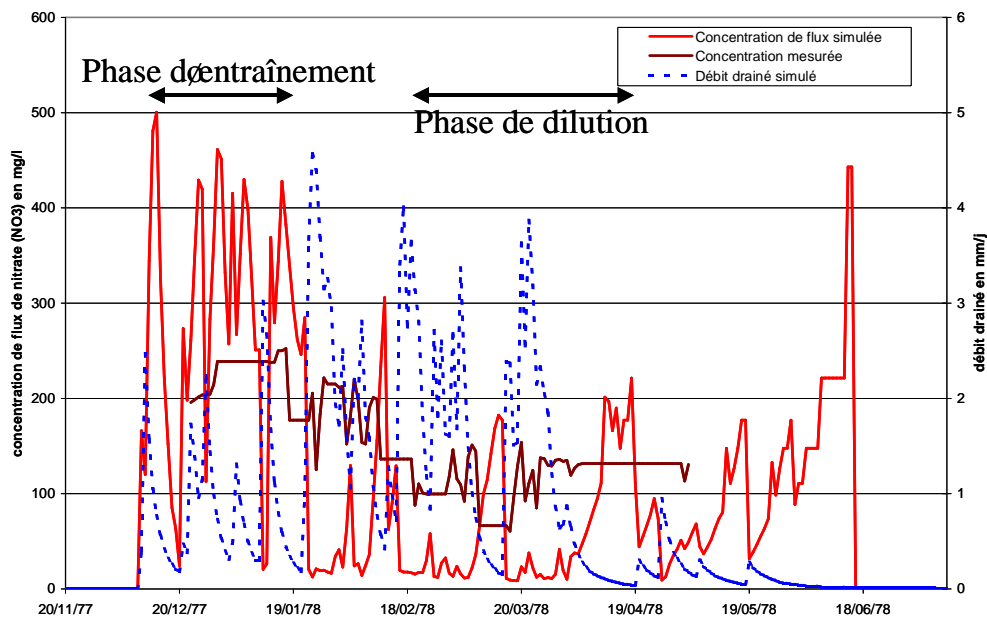


Figure 2 : Comparaison de la concentration de flux simulée à la concentration au drain mesurée, et évolution des débits simulés par STICS.

Du point de vue typologique, ce formalisme permet de reproduire tous les phénomènes déjà observés expérimentalement (Arlot, 1999). Le caractère asymptotique du lessivage, typique d'un lessivage de stock limité est reproduit. Nous reproduisons ainsi les épiphénomènes liés aux phases d'entraînement de l'azote en début de saison de drainage et les phases de dilution pendant la saison de drainage intense. Les concentrations simulées dans le profil suivent bien une décroissance exponentielle conforme à celles qui ont été observées sur site expérimental. Pour la validation, nous avons comparé les chroniques de qualité et les bilans à la parcelle simulées par STICS avec les mesures effectuées sur le site d'Arrou de 1977 à 1978. Ce type d'approche est fortement sensible aux conditions initiales, c'est-à-dire au stock d'azote potentiellement lessivable. La figure 2 confronte les concentrations mesurées à la sortie du drain avec les concentrations de flux calculées à partir des débits et des exportations d'azote journalier simulés par STICS. Compte tenu des erreurs transmises sur les débits, de la variabilité spatiale des solutés dans le sol et surtout de la méconnaissance des conditions initiales, nous nous intéressons aux tendances qui sont bien retranscrites par cette approche simplifiée. En terme de bilan, la simulation par STICS lessive 62 kgN-NO<sub>3</sub>/ha pour un volume drainé équivalent à 183 mm, les mesures donnant 50 kgN-NO<sub>3</sub>/ha pour 226 mm. Pour

information, les rendements simulés s'élèvent à 73 quintaux/ha contre 75 quintaux/ha observés.

Cependant, ce formalisme peut être affiné en déterminant une concentration moyenne de la partie du profil de sol saturé, puis en calculant la quantité exportée obtenue par le débit drainé, et enfin en redistribuant la partie lessivée dans le profil pondéré par la quantité initiale.

### 3- Conclusion

Les tests du modèle STICS concernant la prise en compte du drainage, de l'excès d'eau sur le blé et du lessivage de l'azote ont montré une bonne validation sur les données obtenues par B. Rebière (1996). Néanmoins, la validation de l'outil STICS intégrant ces différents modules sera complète dès que les tests en cours sur une décennie seront achevés. Pour cela nous utilisons les données disponibles sur la parcelle ARROU entre les années 1974-1984, et vérifions la concordance des simulées et des observées en ce qui concerne la physiologie de la plante, le drainage, et le caractère agronomique de ce travail. Il a noté que sur les années 1993-1994, seul à été testé le blé d'hiver. D'autres types de plantes, en plus du blé d'hiver, seront utilisés comme le maïs, l'escourgeon.

#### **Bibliographie**

- Arlot, M. P. (1999). Nitrates dans les eaux. Drainage acteur, drainage témoin? Les enseignements d'une approche hydrologique et hydraulique : - Sur l'influence du drainage agricole sur la contamination diffuse des eaux par les nitrates - Sur les possibilités d'utiliser les parcelles drainées pour l'analyse de la dite contamination. Hydrologie, hydrogéologie, géostatistiques et géochimie des eaux. Paris, Paris 6: 373.
- Brisson, N., Rebière, B., Zimmer, D., Renault, P. (2002). "Response of the root system of a winter wheat crop to waterlogging." Plant and Soil **243**: 43-55
- Lesaffre, B. et D. Zimmer (1988). "Subsurface drainage peaks flows in shallow soil." Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE) **114**: 387-406.
- Nikolic, N., D. Zimmer et C. Kao (2000). Transfert de nitrates dans les bassins versants ruraux amonts : Développement d'un modèle de drainage souterrain dans le modèle STICS., PIREN Seine.
- Rebière, B. (1996). Effet d'un excès d'eau sur la croissance d'une culture de blé d'hiver. Identification d'une variable de stress et analyse de la réponse de la culture. Sciences pour l'ingénieur : Agrohydrologie, Université Louis Pasteur, Strasbourg: 214.

## Passage de STICS4 à STICS5 : mise à jour du paramétrage plante et illustration à partir d'une base de données cultures

Sophie Lebonvallet<sup>1</sup>, Nadine Brisson<sup>1</sup>, Bruno Mary<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INRA Avignon, Unité Climat, Sol et Environnement, Site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9

<sup>2</sup> INRA Laon, Unité d'Agronomie, Rue Fernand Christ, 02007 Laon cedex

### Méthodologie

On a pu se rendre compte que les résultats de simulation par STICS5 présentait pour la plupart un biais et une dispersion plus importants que ceux obtenus avec STICS4 sur le même jeu de données. Afin de recalibrer correctement les paramètres, nous avons utilisé la méthode suivante, en se basant sur le blé comme plante modèle.

Tout d'abord, nous avons re-paramétré le fichier plante de la version 5 de telle façon qu'on retrouve le fichier plante de la version 4 (= inactivation des nouvelles options, retour aux paramètres initiaux). Ensuite, nous avons défini 15 étapes de réintroduction successive de ces différents paramètres et options. Cette démarche a été testée sur 1 jeu de données blé par des critères statistiques (en regardant à chaque étape l'évolution de l'écart quadratique moyen sur l'ensemble des variables, ou RMSE globale, par rapport à l'étape précédente). A partir de ces résultats statistiques, nous avons réalisé un regroupement des étapes entre elle, jusqu'à aboutir à 4 étapes successives, suivies d'une étape d'optimisation des paramètres les plus incertains.

Nous avons ensuite appliqué cette méthode à l'ensemble des plantes pour lesquelles nous disposons de jeux de données.

### Résultats obtenus sur le blé

Nous ne présentons ici que les résultats obtenus en terme de LAI et/ou de matière sèche, qui sont les plus représentatifs de la qualité de simulation.

Tout d'abord, comparons les LAI et les matières sèches simulés par la version 4 de ceux simulés par la version 5 (Fig1) : on note une sous-estimation globale de la version 5.

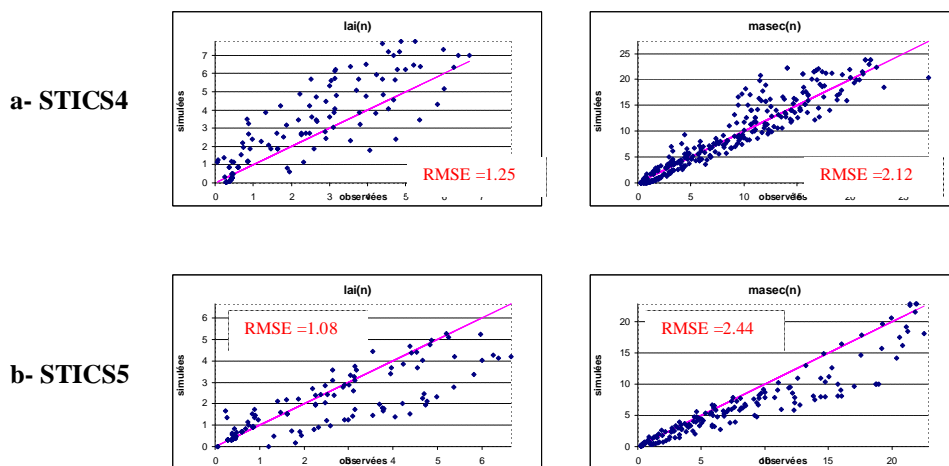


Figure 1- Comparaison entre observé et simulé selon les versions de STICS 4 et 5

En revanche, on arrive à des résultats meilleurs quand on désactive toutes les nouvelles options de la version 5 afin d'arriver à un fichier plante similaire à celui de la version 4 (Fig2) :

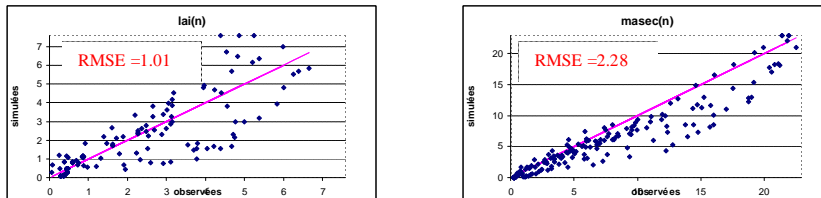


Figure 2- Comparaison entre observé et simulé selon la version de STICS5 modifiée en version 4

Enfin, après réintroduction progressive des 4 groupes d'options, et optimisation de paramètres relativement au LAI (durée de vie d'un cm de feuille adulte et indice de stress azoté sur le LAI) et au rendement (température échaudante maximale pour le remplissage des grains), on obtient une simulation améliorée à la fois par rapport à la version 5 initiale, mais également par rapport à la version 4 (Fig3) :

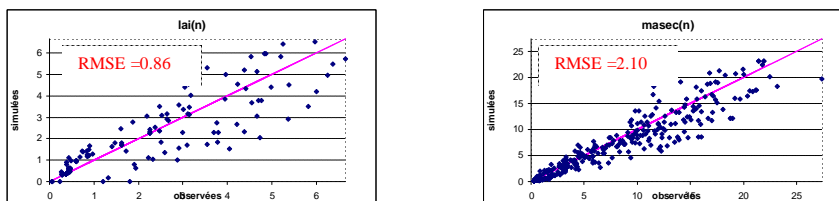


Figure 3- Comparaison entre observé et simulé selon la version de STICS5 optimisée

## Présentation de la base de données utilisée

Nous disposons sur le blé d'environ 70 jeux de données principalement sur Bruyères, Aulnois, Grignon, Pouilly, Boigneville et Orléans, pour environ 10 années, et sur 3 variétés (essentiellement Talent, mais également Arminda et Thésée).

Vus les résultats concluants sur blé, cette méthode est ainsi en train d'être appliquée à différents jeux de données observées sur 8 autres cultures, provenant essentiellement du bassin de la Seine :

- betterave : 21 jeux de données répartis sur Bruyères et Mons - 5 années ó 1 variété
- colza : 7 jeux de données sur Rafidin et Caviza ó 3 années ó 1 variété (Goéland)
- escourgeon : 22 jeux de données sur Bruyère ó 8 années ó 1 variété
- mais : environ 40 jeux de données sur Orléans, Mont de Marsan, Lusignan ó 8 années ó 11 variétés
- pois : environ 70 jeux de données sur Bruyères, Mons et Dijon ó 10 années ó 1 variété
- pomme de terre : 9 jeux de données sur Grignon et Boigneville ó 2 années ó 1 variété (Bintje)
- tournesol : 6 jeux de données à Toulouse ó 1 année ó 1 variété (mi-précoce)
- vigne : 2 jeux de données à Rouffac ó 2 années ó 1 variété (Merlot)



## Session 2

Stics culture et systèmes de culture

Animateur : Christian Dupraz

# Adaptation de STICS à la culture de Laitue sous abri froid : application à la modélisation du drainage et comparaison avec le modèle PASTIS.

F. Gay<sup>(1)</sup>, J. Wery<sup>(2)</sup>, P. Bertuzzi<sup>(3)</sup>

1. CIRAD-CA, programme Calim, TA70/01, Av. Agropolis 34398 Montpellier Cedex 5
2. UMR SYSTEM, CIRAD TA 179/01, Av. Agropolis 34398 Montpellier Cedex 5
3. UR Climat, Sols et Environnement INRA, site Agroparc 84914 Avignon Cedex 9

## Introduction

En maraîchage, la maîtrise de l'irrigation est essentielle pour limiter la lixiviation du nitrate, notamment pour les cultures menées sous abris. Des suivis réalisés en parcelles agricoles (laitues, melons, tomates) montrent que les agriculteurs ajustent leurs apports pour éviter tout stress hydrique pour la plante, mais induisent de cette façon un drainage quasi-permanent sous la zone racinaire (Gay et Wery, soumis). La meilleure gestion de ces cultures passe par la mise au point d'outils d'aide à la décision permettant de diagnostiquer, en parcelles agricoles, les stress pour la plante et les risques de pollution de la nappe associés aux pratiques de l'agriculteur. L'utilisation de modèles de culture combinés avec des mesures de terrain permet de porter ce diagnostic et d'y adjoindre la simulation de stratégies alternatives d'irrigation optimisées sur ces deux contraintes. Cette démarche a été développée dans le cas de cultures de laitues sous abri froid à partir de la combinaison de mesures du potentiel hydrique et de la concentration en nitrate de la solution du sol, effectuées avec des tensiomics, et des modèles STICS et PASTIS, utilisés pour simuler le bilan hydrique de la culture (Gay, 2002). Nous présentons ici les résultats du travail de paramétrage et de comparaison des performances de ces deux modèles pour simuler le bilan hydrique et le drainage d'une culture de laitues sous abri froid, et évaluer la lixiviation du nitrate sous la culture.

### Adaptation de STICS à la laitue

L'adaptation de STICS à la laitue est en partie basée sur le module plante élaboré par De Tourdonnet (2001) pour simuler la croissance et les besoins en eau et en azote d'une culture de laitues dans PASTIS. La principale modification concerne l'introduction du calcul du taux de couverture du sol (TAUXCOUV), variable plus pertinente que l'indice foliaire pour le calcul de l'interception du rayonnement et de la consommation en eau d'une culture de laitues. Un module de calcul du climat sous l'abri (température et rayonnement) en fonction du climat extérieur a par ailleurs été créé à partir des travaux de Wang et Boulard (2000) (cf séminaire STICS 2000).

## Matériel et Methodes

Le paramétrage et un premier test des modèles ont été effectués à partir des données recueillies sur une expérimentation mise en place par l'unité CSE de l'INRA d'Avignon (AVI). Les modèles ont ensuite été calés et testés sur les données issues de 3 suivis en parcelles d'agriculteur situées sur la zone vulnérable de la Vistrenque dans le Gard (VIS99, VIS00, VIS01). Les variables mesurées dans ces essais étaient : la température et le rayonnement sous l'abri, la teneur en eau du sol (sondes à neutron et TDR pour AVI, mesures gravimétriques pour les essais VIS), le taux de couverture des plantes, le nombre des feuilles de longueur supérieures à 1cm, la profondeur d'enracinement et la densité racinaire (AVI seulement), l'évapotranspiration de la culture à partir de minilysimètres (AVI seulement). Dans les essais VIS99, VIS00 et VIS01, le potentiel hydrique et la concentration en nitrate de la solution du sol ont été mesurés à 50 et 70 cm de profondeur.

## Résultats

### Paramétrage et test du module plante

Les fonctions d'évolution du taux de couverture (TC), de croissance de la profondeur et de la densité racinaire ont pu être calibrées à partir des données de l'essai AVI. L'option par profil type a été utilisée pour simuler la croissance de la densité racinaire.

Le paramétrage de la fonction TC a pu être testé dans les 3 essais en parcelles d'agriculteurs. Les évolutions de TC décrites par PASTIS et STICS sont très proches malgré les différences

de formalismes utilisés dans les 2 modèles (fig.1). Le paramétrage effectué sur l'essai AVI permet de décrire correctement les cinétiques de TC observées dans les essais VIS99 et VIS00, mais pas pour l'essai VIS01. Dans ce cas, la mise en place de TC est beaucoup plus longue que celle simulée par le modèle. Ces différences peuvent être attribuées à un effet du rayonnement. En effet, l'essai VIS-01 correspond à une culture d'automne-hiver avec un cumul de PAR incident inférieur à  $500 \text{ mol.m}^{-2}$  sur le cycle, tandis que les 3 autres essais correspondent à des cultures de fin d'hiver avec des cumuls de PARi supérieurs à  $700 \text{ mol.m}^{-2}$ . La prise en compte de ce facteur est donc nécessaire pour pouvoir utiliser le modèle pour une gamme de conditions couvrant toute la saison de culture de la laitue.

#### Evaluation de la prévision de l'ETR

La figure 2 montre l'évolution de l'ETR journalier simulé par STICS et PASTIS et estimé à partir des pertes d'eau mesurées sur les mini-lysimètres dans l'essai AVI. Les modèles reproduisent correctement la dynamique de la consommation en eau par la culture observée. L'ajustement entre valeurs mesurées et simulées montre que PASTIS donne de meilleurs résultats que STICS (resp.  $R^2=0.88$  et  $R^2=0.71$ ). On constate que STICS a notamment tendance à sous estimer l'ETR en début de cycle, et à la surestimer en fin de cycle par rapport à PASTIS.

#### Simulation de l'état hydrique et des transferts d'eau dans le sol

Les ajustements entre les valeurs mesurées et simulées pour les stocks d'eau dans le profil (0-60cm), et les teneurs en eau par couche montrent que PASTIS restitue mieux les données observées que STICS (resp.  $R^2=0.904$  et  $R^2=0.881$  pour les stocks, et  $R^2=0.782$  et  $R^2=0.615$  pour les teneurs en eau). STICS reproduit bien les stocks d'eau observés sauf dans l'essai AVI pour lequel il les sous estime en fin de cycle (Fig. 3). STICS sous estime systématiquement les teneurs en eau dans l'horizon de surface en fin de cycle pour les 4 essais (fig.4). Ces résultats s'expliquent par l'incapacité de STICS à rendre compte des phénomènes de remontées capillaires et de redistribution de l'eau entre les couches du fait de son fonctionnement hydrique de type réservoir, contrairement à PASTIS dont le fonctionnement est basé sur l'équation de Richards.

La comparaison des dynamiques des flux d'eau sous les racines, à 60cm de profondeur, dans l'essai VIS99 illustre également ces différences de fonctionnement (fig.5). STICS ne simule que des flux positifs, c'est à dire du drainage, localisés le jour suivant une irrigation. PASTIS simule à la fois des flux positifs et négatifs, correspondant à des remontées capillaires. L'évolution du sens des flux donnée par PASTIS est par ailleurs cohérente avec les gradients hydrauliques calculés à partir des mesures tensiométriques à 50 et 70cm. Le calcul des quantités d'azote nitrique lixiviées, en multipliant les flux simulés par les modèles par les teneurs en nitrate mesurées à 50 et 70cm, montre que l'erreur faite en utilisant STICS va dépendre de l'intensité des remontées capillaires en fin de cycle. Quand elles sont faibles, STICS, malgré une mauvaise simulation de la dynamique des flux, donnent des quantités de N-NO3 lixiviées proches de celles obtenues avec PASTIS.

#### **Conclusion**

Les modifications et le paramétrage effectuées pour adapter STICS à une culture de laitues permettent de rendre compte de manière satisfaisante du fonctionnement de la plante. Par contre, les principes de modélisation des transferts d'eau dans le sol ne permettent pas de reproduire correctement la dynamique de l'eau dans et sous l'horizon exploité par les racines. Ces résultats ont deux conséquences par rapport aux objectifs de diagnostic en parcelles agricoles. STICS peut être utilisé pour l'évaluation des risques de pollution nitrique, notamment pour la comparaison de parcelles, mais le modèle va avoir tendance à surestimer le risque compte tenu de la non prise en compte des remontées capillaires. Pour le diagnostic des stress hydriques et le test de stratégies alternatives d'irrigation optimisées sur les risques de pertes de rendement et les risques de pollution, STICS ne peut être appliqué car le modèle sous estime la teneur en eau dans la zone racinaire et risque donc de surestimer l'intensité des stress. Dans ce cas, un modèle comme PASTIS est plus approprié.

#### **Références bibliographiques**

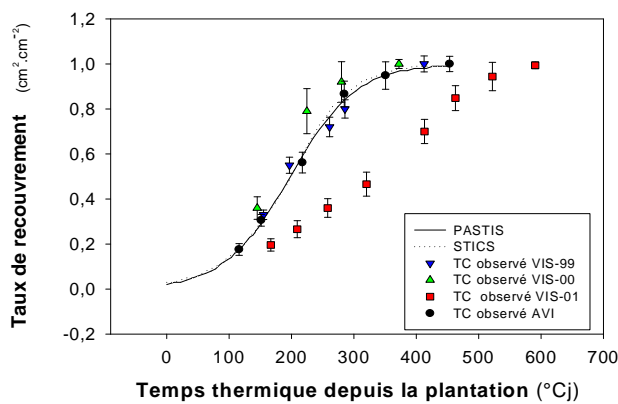
**De Tourdonnet, S., Meynard J.M., Lafolie F., Estrade J.R., Lagier J., Sebillote M. 2001.** Non uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of N pollution and lower product quality. *Agronomie*. 21, 297-309.

**Gay, F. and Wery, J.** Asking the fields to talk about their farmers practices : a case study on management of crop stress and nitrate leaching in vegetable crops in a vulnerable zone. Soumis à European Journal of Agronomy.

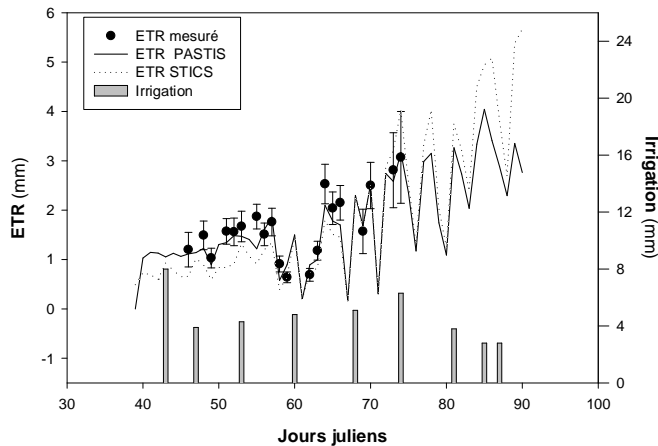
**Gay, F. 2002.** Elaboration d'indicateurs des risques de pollution nitrique et de pertes de rendement pour l'évaluation des pratiques d'irrigation en cultures intensives. Application au cas des cultures de laitues sous abri froid. Thèse de l'école doctorale Biologie intégrative, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 169p.

**Lafolie, F. 1991.** Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical non-equilibrium and optimization of the root water potential. *Fertilizer Research*. 27, 219-231.

**Wang, S. and Boulard, T. 2000.** Measurement and prediction of solar radiation distribution in full-scale greenhouse tunnels. *Agronomie*. 20, 41-50.



**Figure 1 :** Evolution des taux de couverture observés (points) et simulés (traits) dans les 4 essais.



**Figure 2 :** Comparaison de l'ETR observé et simulé par STICS et PASTIS pour l'essai AVI.

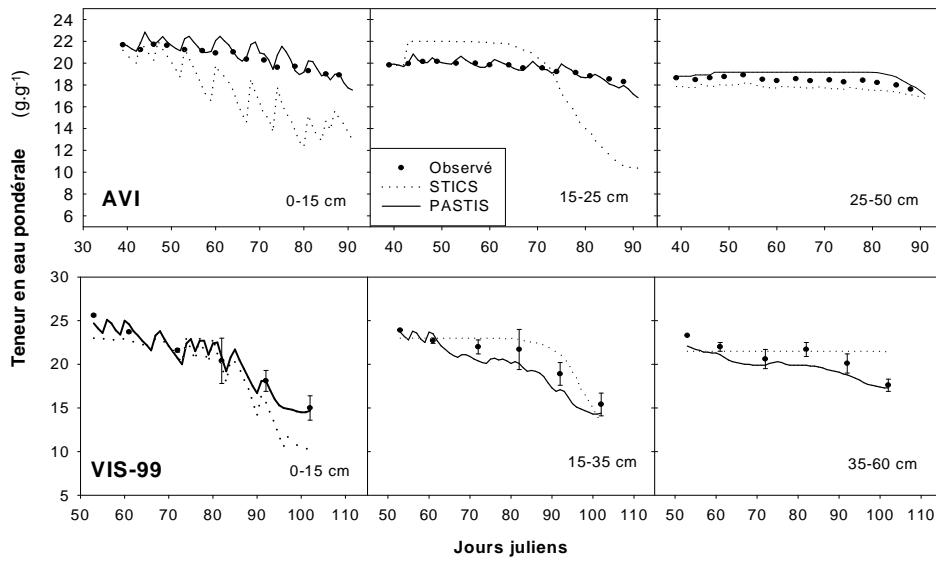


Figure 4 : Evolution des teneurs en eau pondérales par couche observées (symboles) et simulées par PASTIS (trait plein) et STICS (pointillés) dans les essais AVI et VIS-99

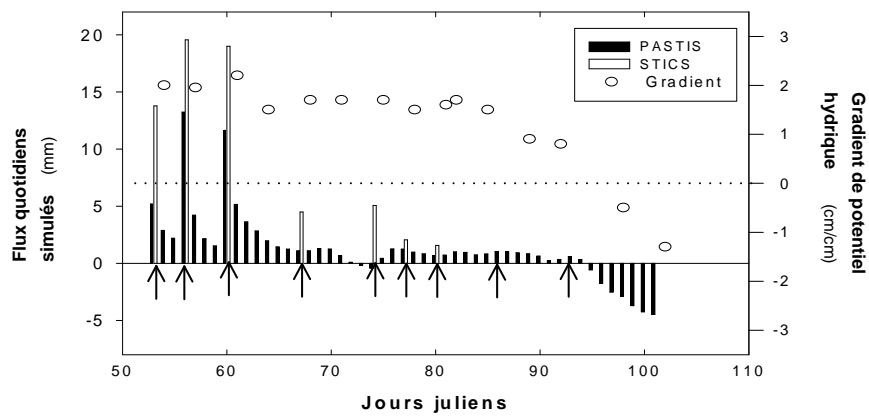
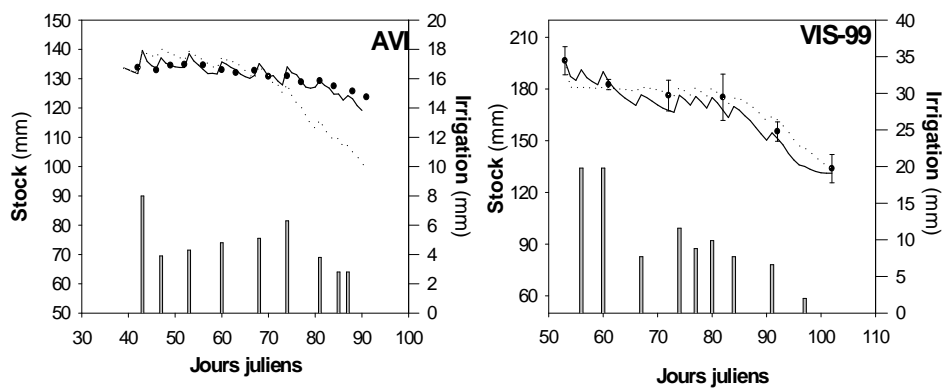


Figure 5 : Evolution des flux d'eau journaliers à 60 cm de profondeur simulés par STICS (barres vides) et PASTIS (barres pleines), et du gradient hydraulique calculé à partir de potentiels hydriques mesurés à 50 et 70 cm sur l'essai VIS-99. Les flèches indiquent les irrigations



**Figure 3** : Evolution des stocks d'eau dans le profil observés (point) et simulés par PASTIS (trait plein) et par STICS (pointillés) dans les essais AVI et VIS-99. Les barres verticales représentent les irrigations.

# **Paramétrage de STICS v.5 pour une nouvelle culture : essai de contribution à la réflexion méthodologique.**

## **L'exemple de la moutarde blanche utilisée comme culture intermédiaire.**

**Eric JUSTES**  
INRA, Unité d'Agronomie de Toulouse

### **Introduction**

La moutarde blanche (*Sinapis alba* L.) est très utilisée comme culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) en interculture (période entre deux cultures principales) pour réduire les pertes de nitrate par lixiviation. Nous avons paramétré et évalué le modèle STICS 5 (Brisson *et al.*, 1998 ; 2002 ; 2003) pour cette espèce, tout comme pour le RGI (non abordé ici), dans le but de réaliser des simulations de scénarios de conduite de ces CIPAN (Dorsainvil, 2002 ; Alexandre, 2002). La méthode de paramétrage que nous avons adoptée, notamment dans la thèse de Fruck Dorsainvil (2002), découle du travail réalisé par Mouna Ghiloufi et Nadine Brisson pour le tournesol et la betterave (Ghiloufi, 1999).

Pour limiter le nombre de paramètres à estimer, nous avons d'abord cherché à définir les paramètres les plus sensibles du modèle sur la base de résultats de l'analyse de sensibilité réalisée par Ruget *et al.* (2002) et d'une analyse plus restreinte que nous avons réalisée par « essai erreur » en utilisant des données de CIPAN (car les conditions d'alimentation en eau et azote sont différentes d'autres cultures notamment) ; cette dernière étape a l'avantage de permettre une compréhension « pratique » (en plus de la compréhension des équations ou des algorithmes informatiques) et une appropriation du fonctionnement du modèle. Seuls les paramètres « non mesurables » ou non mesurés faute de moyens ont fait l'objet d'une estimation mathématique en utilisant l'optimiseur de WinStics (méthode du Simplex). Ce choix nous a imposé une contrainte (à la date à laquelle nous avons fait le travail) : celle de ne pouvoir optimiser simultanément que 5 paramètres en utilisant les données des expérimentations d'une seule variable mesurée ou calculée. Par ailleurs, compte tenu du nombre de paramètres de STICS et de ceux à estimer pour une nouvelle culture, nous n'avons pas utilisé la méthode proposée par Wallach *et al.* (2001) pour choisir les paramètres les plus sensibles, car sa mise en œuvre nous a semblé demander un investissement trop important par rapport aux moyens que nous pouvions engager ; de plus le nombre de paramètres à estimer pour lesquels on ne disposait pas de valeur approchée (car « non mesurables ») était très élevé. En conséquence, nous avons choisi d'estimer les paramètres « module par module ». Bien que conscients des inconvénients que représente d'un point de vue statistique l'estimation séquentielle de plusieurs groupes de paramètres (Makowski et Jeuffroy, 2002), nous avons néanmoins choisi cette solution car elle nous a paru plus simple et donc plus facile à maîtriser (pas besoin d'algorithmes ni de programmation informatique complexes) et cohérente avec la formalisation du fonctionnement agronomique de la culture. Néanmoins, nous avons pris soin de réaliser *in fine* un calage « inter modules » sur les 5 paramètres considérés comme les plus sensibles du modèle afin d'utiliser simultanément toutes les informations disponibles et d'avoir des estimations cohérentes avec les valeurs référencées. Enfin, la robustesse du paramétrage a été testée sur un jeu de données complètement indépendant (sol, climat et conduite culturale) pour s'assurer de la qualité de prédiction du modèle nouvellement paramétré (Dorsainvil, 2002 ; Alexandre, 2002). Nous n'aborderons pas

l'étape de validation du paramétrage dans ce document ; nous pouvons néanmoins dire que les résultats de validation sont tout à fait satisfaisants, notamment pour la moutarde (Dorsainvil, 2002 ; Alexandre, 2002).

### **Méthode : La démarche adoptée**

Nous avons choisi de réaliser préalablement à l'estimation des paramètres spécifiques et variétaux de STICS de s'assurer que les paramètres d'entrée du module sol étaient correctement renseignés afin d'éviter des « confusions d'effet ». Une seule variété de moutarde a été utilisée et paramétrée, même si l'évaluation a été réalisée pour des essais où différentes variétés ont été utilisées.

#### **a) Paramètres du module sol**

Compte tenu de sa sensibilité en situation de contrainte hydrique et de la nécessité de correctement simuler le bilan hydrique, le paramètre sol d'entrée  $Q_0$  (seuil d'évaporation où le sol s'évapore plus à l'ETP) a été estimé sur chaque expérimentation pour laquelle on disposait de sol nu (sans plante). Ne disposant d'aucune référence sur nos situations expérimentales ou comparables (notamment pour les sols de craie), ce travail nous a paru nécessaire. L'estimation a été réalisée avec l'optimiseur de WinStics et en utilisant les valeurs de teneur en eau du sol mesurées sur 120 cm au cours du temps (environ tous les quinze jours durant 9 à 12 mois).

#### **b) Paramètres mesurés expérimentalement ou calculés**

Outre les paramètres fixés à partir de l'analyse bibliographique, qui ont été peu nombreux car cette plante a été très peu étudiée, des expérimentations ont été mises en place spécifiquement pour le paramétrage de STICS-moutarde. Quatre sites expérimentaux ont été conduits en 1999-2000 et 2000-2001 en Champagne (51), à Boigneville (91) et à Lusignan (86) en collaboration avec nos collègues, respectivement, de la Chambre d'Agriculture de la Marne, de l'ITCF et de l'INRA. Nous avons cherché à faire varier la date de semis, le niveau d'alimentation hydrique et azoté de la culture.

Les paramètres liés au photopériodisme et au développement ont été observés sur les expérimentations *in situ*. Les paramètres liés à la germination, levée et températures de croissance ont été déterminés à partir d'expérimentations indépendantes réalisées en milieu contrôlé. Le coefficient d'extinction a été déterminés à partir de mesures de bilan radiatif *in situ*. Les paramètres des courbes de dilution (critique et maximum) ainsi que ceux formalisant l'abscission des feuilles ont été calculées sur une des expérimentations spécifiques. Les paramètres liée à la compétition intra et inter plantes ont été fixés à partir du travail réalisé sur une autre crucifère, le colza (R. Roche, non publié).

#### **c) Paramètres spécifiques estimés du module plante**

Nous avons choisi de séparer le travail de paramétrage en 2 phases : la première en utilisant le modèle STICS-feuille (stics5f.exe), où l'indice foliaire est forcé, et la seconde avec le modèle STICS normal (stics5.exe). Comme la surface foliaire est une variable clé du modèle STICS, cette option offre l'avantage de ne pas cumuler ou de « faire interférer » les éventuelles mes estimations d'indice foliaire (LAI) sur l'ensemble des paramètres des autres modules. Ensuite, l'ordre d'ajustement des paramètres a été déterminé en fonction de l'analyse du formalisme du modèle et pour garder le plus de cohérence possible entre la valeur du paramètre estimé et réalisé comme suit :



### Indice foliaire interpolé et stades de développement observés forcés

- a) Module « Racines » (option densité vraie). Cinq paramètres ont été estimés :
  - *croirac*, *sensrec* sur la variable *Zrac* avec tous les traitements expérimentaux
  - *contrdamax*, *draclong*, *lvfront* sur les variables calculées *LRACH(1)* à *(4)* par passages successifs et *in fine* sur *LRACH(2)* avec tous les traitements expérimentaux
- b) Module « Biomasse aérienne ». Deux paramètres ont été estimés :
  - *efcroijuv*, *efcroiveg* sur la variable *masec(n)* avec les traitements non-limitants en eau et azote
- c) Module « eau plante ». Deux paramètres ont été estimés :
  - *kmax*, *psito* sur la variable *resmes* avec tous les traitements expérimentaux
- d) Module « azote plante ». Trois paramètres ont été estimés :
  - *Vmax1*, *Kmabs2*, *Vmax2* sur la variable *Qnplante* avec tous les traitements expérimentaux

### Indice foliaire interpolé et date de levée forcée

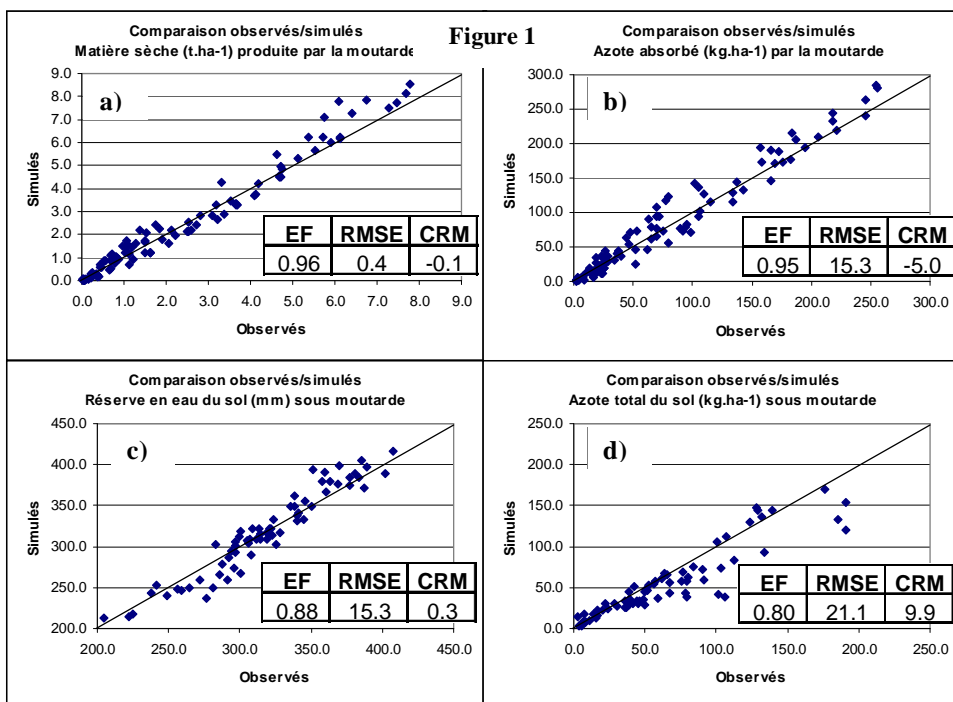
- e) Module « développement » (hormis les phases d'élaboration du rendement). Deux paramètres ont été estimés :
    - *stlevamf*, *stamflax* respectivement sur les variables *iamf* et *iflax* avec tous les traitements expérimentaux
1. Date de levée forcée et Indice foliaire généré (vert + sénescent + tombé au sol)
    - f) Module « Indice foliaire option LAI net »
      - a) Paramètres déterminant le LAI généré (surface foliaire totale produite). Cinq paramètres ont été estimés :
        - *laicomp*, *vlaimax*, *pentlaimax*, *udlaimax*, *dlaimaxbrut*, respectivement sur la variable *lai(n)* pour laquelle c'est en réalité le LAI généré qui est indiqué à la place de la variable *lai(n)* dans le fichier \*.obs ; la durée de vie des feuilles (*durvieF*) est alors mise à une valeur très élevée pour ne pas avoir d'effet. Cinq paramètres ont été estimés avec les traitements non-limitants en eau et azote :
  2. Date de levée forcée et Indice foliaire vert
    - b) Paramètres déterminant la sénescence « naturelle » des feuilles et le LAI vert. Trois paramètres ont été estimés :
      - *durieI*, *durvieF*, *durviesupmax* respectivement sur la variable *lai(n)* pour laquelle c'est en réalité de LAI généré qui est indiqué avec les traitements non-limitants en eau et azote
    - c) Paramètres déterminant les effets de stress N et hydrique sur la durée de vie des feuilles et le LAI vert. Trois paramètres ont été estimés :
      - *innturgmin*, *innsen*, *rapsenturg* respectivement sur la variable *lai(n)* avec les traitements limitants en eau et azote
    - g) Optimisation « inter modules ». Cinq paramètres ont été re-estimés :
      - *durvieF*, *innturgmin*, *efcroijuv*, *efcroiveg*, et *Vmax2* sur la variable *Qnplante* avec tous les traitements expérimentaux

Finalement, ce sont 25 paramètres qui ont été estimés

## Quelques résultats du travail de paramétrage

Les résultats du travail de paramétrage indiquent que l'efficacité du modèle est satisfaisante ( $>0.8$ ) pour la grande majorité des variables simulées et est même très bonne ( $>0.95$ ) pour la matière sèche et l'azote absorbé par la moutarde (figure 1a, 1b). Le seul biais significatif observé concerne la simulation de l'azote minéral du sol : le modèle a tendance à toujours sous estimer l'azote du sol d'environ  $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (figure 1d). L'erreur moyenne est globalement importante (entre 15 et 30 % de la valeur moyenne des observés) mais ces valeurs importantes sont dues au grand nombre de très faibles valeurs des variables testées. La réserve en eau du sol qui présente très peu de faibles valeurs est simulée avec une erreur moyenne de 5 et 9 % pour la moutarde (figure 1c).

L'étape de validation réalisée avec des données acquises indépendamment, a également donné des résultats globalement satisfaits pour la matière sèche, l'azote absorbé, l'azote nitrique et l'eau dans le sol ( $EF \geq 0.8$ ).



## Conclusions

- **Sur le plan « méthodologique »**

Notre souci était de garder, autant que possible, des valeurs de paramètres estimés les plus cohérents possible avec les valeurs mesurées. Néanmoins, certains paramètres ne sont pas « mesurables ». Selon nos collègues statisticiens, la méthode adoptée ne serait pas la plus rigoureuse. D'autre part, une question demeure néanmoins avec leurs propositions : dans quelle mesure les résultats de l'analyse de sensibilité dépendent-ils des expérimentations de la base et donc des itinéraires techniques et pédoclimats représentés ?

- **Sur le plan informatique**

Il me semble nécessaire, si on veut en pratique utiliser les approches statistiques plus rigoureuses proposées par Wallach *et al.* (2001) ou Makowski et Jeuffroy (2002), que des outils informatiques simples et si possible standards soient disponibles rapidement. Cependant, un petit espoir est né du côté de Toulouse avec la BAO développée par MH Charron et D Wallach. Affaire à suivre!

## **Références Bibliographiques**

- Alexandre M., 2002. Evaluation par simulation avec le modèle STICS des effets environnemental et agronomique des cultures intermédiaires pièges à nitrates. *Mémoire de DAA*, INP-ENSAT, 69 p.
- 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 crop 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 K., 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 crop 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 G., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-322.
- 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-PG, Paris, 124 p + annexes.
- Ghiloufi M., 1999. Méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures : application au tournesol et à la betterave. *Mémoire de DAA*, INA P-G, Paris, 48 p + annexes.
- Makowski D., Jeuffroy M-H., 2002. Estimation des paramètres des modèles de culture. In : *Pour une bonne utilisation des modèles de culture*, Document de l'École-Chercheurs INRA Département Environnement et Agronomie ó FormaSciences, 14-18 octobre 2002, Le Croisic.
- Ruget F., Brisson N., Delécolle R., Faivre R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie*, 22, 133-158.
- Wallach D., Goffinet B., Bergez J-E., Debaeke P., Leenhardt D., Aubertot J-N., 2001. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal*, 93, 757-766.

## Modélisation d'une espèce ligneuse pérenne à fruits charnus : la vigne

Christian Gary<sup>1</sup>, Nadine Brisson<sup>2</sup>, Jean-Pierre Gaudillère<sup>3</sup>, Marcelo Duarte<sup>4</sup>

<sup>1</sup> INRA, UMR SYSTEM, CIRAD TA 40/01, avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5

<sup>2</sup> INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, domaine Saint Paul, site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9

<sup>3</sup> INRA, UMR Oenologie Ampélogie, Domaine de la Grande Ferrade, 71 avenue Edouard Bourloux, BP81, 33883 Villenave d'Ornon cedex

<sup>4</sup> CITRA, Facultad des ciencias agronomiques, Universidad de Talca, Casilla 747, Talca, Chili

### Résumé

Du point de vue de la modélisation des cultures, la vigne présente un certain nombre de difficultés. Il s'agit en effet d'une espèce pérenne ligneuse, qui produit des fruits charnus, qui est fréquemment cultivée en conditions de stress hydrique et minéral et dont le couvert végétal présente une structure en rangs à faible indice foliaire. Cela a conduit à faire évoluer le modèle STICS sur plusieurs processus de développement, de croissance et de fonctionnement hydrique et azoté.

Le début du cycle de végétation est marqué par le débourrement, dont la date peut-être forcée ou bien calculée dans le modèle en sommes de température à partir de la levée de dormance. Les principales étapes du cycle (floraison, véraison) sont prédites à partir de sommes de température. La maturité des baies peut-être déterminée soit comme un stade de fin de croissance, soit comme un stade atteint à une teneur en sucres déterminée. Le type de développement retenu est de type indéterminé pour tenir compte de l'hétérogénéité des stades de développement des baies.

L'interception du rayonnement dont dépend transpiration et production de biomasse est liée au développement foliaire. Celui-ci est caractérisé par deux étapes distinctes de croissance des rameaux primaires et secondaires, traduites dans le modèle par l'évolution de la densité foliaire. L'indice foliaire est régulé à travers la technique du rognage, les fruits peuvent être éclaircis et les rameaux sont taillés en fin de cycle. L'équilibre des activités des sources et des puits de carbone détermine la dynamique des réserves carbonées.

Le développement des baies est marqué par leur dynamique hydrique. Trois hypothèses sont en cours de test pour la représenter dans STICS :

- la teneur en eau dépend uniquement du stade de développement de la baie (pas d'effet des conditions environnementales) ;
- la teneur en eau dépend de l'état hydrique de la culture, en étant une fonction de la différence de température entre la culture et l'air ;
- la teneur en eau dépend d'une combinaison entre état de développement et état hydrique de la culture.

On pourrait également envisager de représenter le processus comme la résultante de flux de matière sèche et de flux d'eau vers les baies.

La simulation du fonctionnement des sols viticoles présente des difficultés, liées en particulier à la variabilité de leur profondeur et à la présence de cailloux en profondeur (comment contribuent-ils à la réserve en eau du sol ?) et en surface (où ils affectent l'albédo et donc le bilan radiatif et la température de la culture). Ces caractères particuliers compliquent également la caractérisation de la structure du système racinaire. Les paramètres liés au fonctionnement hydrique du sol étant d'un accès difficile, la réserve en eau accessible à la

culture est donc souvent déterminée avec une faible précision, ce qui a des conséquences sur la qualité de prédiction des effets du stress hydrique. La simulation de cultures conduites avec différents niveaux d'irrigation (Université de Talca, Chili) a montré la grande sensibilité du modèle à ces paramètres et aux conditions initiales de réserves en eau et d'enracinement. Une alternative serait d'ajuster les propriétés du sol et de l'enracinement à partir d'une variable plus facile d'accès comme le potentiel hydrique de la plante.

Les fortes interactions entre eau et azote dans le sol imposent de ne pas négliger les processus liés au stress azoté. Ce qui pose les questions de la pertinence de la courbe critique et du rôle éventuel des réserves azotées pour une espèce ligneuse comme la vigne. Cela est vrai en particulier quand la vigne est associée avec une culture intercalaire herbacée et se trouve donc en situation de concurrence pour les ressources hydriques et azotées.

Le paramétrage et l'évaluation du modèle sont réalisés à partir d'une base de données en cours de constitution à partir du dispositif expérimental de l'INRA (Bordeaux, Angers, Montpellier), de réseaux professionnels (en 2002, Chambre d'Agriculture du Vaucluse et Centre d'Information Régional Agrométéorologique de Carpentras) et de collaborations internationales (Université de Talca, Chili).

Les premiers résultats mettent en évidence la nécessité d'un travail approfondi d'une part sur la modélisation de l'allocation des ressources entre organes végétatifs, organes reproducteurs et réserves et, d'autre part, sur la modélisation du fonctionnement hydrique et azoté du sol et de ses conséquences sur le fonctionnement de la plante.



## Stics et les cultures de bananes associées

Régis **TOURNEBIZE**, Luis Mauro **SANTOS SILVA\***, Cathy **CLERMONT-DAUPHIN**,  
Harry **OZIER-LAFONTAINE**, Simon **LEINSTER**

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE - UR Agropédoclimatique  
Domaine Duclos - Prise d'Eau  
97170 PETIT BOURG

\*UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA Centro Agropecuario  
Caixa Postal N°222 CEP 68.501-970  
MARABA ó PARA - BRASIL

### Le système de culture bananier

Avec plus de 85 millions de tonnes produit par 120 pays la banane constitue un enjeu alimentaire et économique mondial important. La banane dessert avec 55 millions de tonnes par an constitue la seconde production mondiale de fruit derrière l'orange et devant le raisin.

La Guadeloupe et la Martinique produisent 370 000 tonnes de bananes dessert (respectivement 100 000 et 270 000 tonnes). Ce système de culture avec celui de la canne à sucre, est le plus répandu, et contribue à l'emploi comme à la typicité des paysages.

Le système d'exploitation classique actuel est intensif et se décline ainsi :

- plantation a tout moment de l'année souvent derrière bananes, parfois derrière jachère (2000 plants.ha-1) sur des sols souvent très pentu, soumis à des pluies parfois intenses (risque d'érosion),
- engrais de fonds, puis engrais azoté tous les mois (25 g pied<sup>-1</sup>, soit 600 kg ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup>),
- traitements insecticide et nématicide, (respectivement mensuellement et trimestriellement, le plus souvent),
- désherbage chimique tous les 2 mois environ,
- récolte après 9 mois environ (suivant l'altitude),
- destruction de la plantation après 3 à 5 cycles en fonction des diminutions de rendement notamment liées au taux d'infestation de nématodes.

Les principaux freins au développement de la production sont de deux ordres :

- économique ; les exploitants se plaignent des faibles prix de vente, et de l'irrégularité des paiements qui nuit à un bon suivi des parcelles
- agronomique ; la production décroît très rapidement après le premier cycle, lié aux infestations d'insectes, de maladie cryptogamique et de nématode.

Le nématode *Radopholus similis*, endoparasite, semble représenter un des plus graves dommages des plantations de bananes tropicales (Marin et al., 1999). L'efficacité des traitements chimiques semble faible (sol argileux, mauvaise migration de la matière active) et aléatoire et le coût prohibitif (1000 € traitement<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup>).

Des études montrent qu'après une jachère en sol nu d'au moins six mois la population de nématodes chute et qu'elle permet alors la remise en culture de bananiers sans traitement pour au moins 3 cycles.

Se pose ici le problème de réinfestation par les parcelles voisines, d'où l'idée de mettre en place avec les bananiers des espèces susceptibles d'aider au maintien du nombre de nématodes en deçà du seuil de nuisibilité, et peut être d'avoir d'autres utilités ; se sont les plantes de services.

### Les plantes de services

Le concept est donc d'adjoindre à la culture de bananiers une plante susceptible d'offrir un ou plusieurs services, susceptible de diminuer les risques environnementaux et de réduire l'apport de produits chimiques.

Cette plante pourrait par exemple

- couvrir rapidement le sol afin d'éviter le ruissellement sur les parcelles de jeunes bananiers
- fournir de l'azote
- avoir des propriétés nématoregulatrice ou nématicide
- remonter des éléments minéraux profonds
- augmenter la biodiversité et ainsi assurer un meilleur contrôle des phytophages (Estevez et al., 2000, Schroth et al., 2000), voir atténuer le pouvoir pathogène des nématodes lorsque les espèces sont nombreuses (Cadet et al., 2000).

Le travail consiste donc à concilier la culture d'une plante « miracle » au sein de la conduite d'une bananeraie, et si possible de pouvoir modéliser les phénomènes d'interactions, et de synergies le cas échéant. Stics banane (Brisson et al, 1998) déjà établis et Stics culture associées en phase de validation (Brisson et al, en préparation, Brisson, 1998) ont donc été utilisés pour validation lors de ces essais.

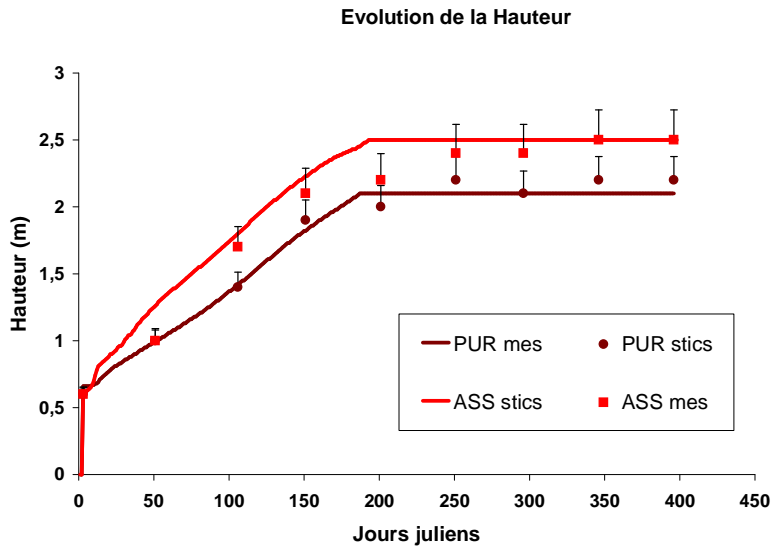
### Matériel et méthode

L'expérimentation a consisté à mettre en place à Duclos (16,3° de latitude, 61° de longitude Ouest) 2 traitements de bananiers plantés en quinconce à une densité de 1890 plant. ha<sup>-1</sup>, l'un en pure, l'autre avec une association entre les rangs de *Canavalia ensiformis* (une légumineuse tropicale) à une densité de 25 000 plant.ha<sup>-1</sup>.

Tous les 10 jours environ des mesures de développement (hauteur, diamètre, nombre de feuilles, longueur et largeur) étaient effectuées sur 10 bananiers de chaque traitement. Trimestriellement des mesures de biomasse et de LAI ont été réalisées sur 3 plants de chaque traitement.

### Résultats Discussion

Nous présentons uniquement les données relatives à l'aspect aérien du bananier, les aspects souterrains (racines, bilan hydrique) sont en cours de traitement.



**Graphique 1 :** Evolution des hauteurs de plantes, mesurées (●) et simulées (—) pour les bananiers purs (●) ou associés (●).

On remarque une très bonne relation mesure et modèle ( $r^2 = 0,98$  et  $0,97$  respectivement en pur et en associé), avec une légère sur estimation des hauteurs en début de cycle pour le bananier associé, indiquant sans doute une mauvaise paramétrisation des phénomènes de compétition.

**Tableau I :** Comparaison mesure/modèles de données liées au rendement.

	Bananiers Purs		Bananiers Associés	
	Mesure	STICS	Mesure	STICS
Rdt fruits (tonne)	27,5 (5,4)	27	34,8 (7,3)	36,4
Date récolte	10/11(27 j)	5/11	26/11 (27 j)	4/11
Nbre de fruit/plt.	102 (12)	130	120 (19)	135

( ) écart type.

Dans l'ensemble STICS donne satisfaction pour l'estimation des rendements de bananes en pure comme en associé. Il reste sans doute à mieux prendre en compte les différences en terme de développement entre un bananier pur et un associé, afin de mieux adapter les paramètres à chaque situation. (différence de développement, différence de température lié à la transpiration de l'association, effet des stress sur le cycle)

Outre l'aspect validation de STICS l'association bananiers/Canavalia semble intéressante car elle a permis de ne faire que 4 désherbages en parcelle associée contre 8 en pur.



De même, l'effet nématoregulateur du canavalia semble se confirmer puisqu'on a dénombré 400 nématodes sur 100g de racines de bananier associé contre 12 667 en pur.

### **Perspectives**

Il reste à valider STICS sur l'ensemble des paramètres, notamment le rayonnement, le bilan hydrique et le profil racinaire...

Ensuite si l'on souhaite utiliser STICS de façon pérenne tout au long du cycle de production d'un bananier (5 ans environ) il faudra songer à tenir compte de :

- l'hétérogénéité de floraison et de récolte, qui, en situation de non fertilisation s'étend sur plus de trois mois,
- l'effet des ravageurs comme les nématodes, nécrosant les racines, perturbant l'assimilation de l'eau et des éléments nutritifs, et accentuant le phénomène de verse,
- la reproduction du bananier par rejets qui se développent assez tôt dans le cycle du pied mère.

Enfin pour modéliser les différentes modalités de mise en place des cultures de services, (avant, simultanément ou après plantation du bananier) nous aurions besoin que STICS puisse permettre plus facilement la prise en compte :

- des espèces associées indifféremment plus hautes ou plus petites que le bananier, au moins dans une partie du cycle ;
- d'une troisième espèce

Quoi qu'il en soit STICS semble d'ors et déjà très utile, et facilitera sans doute le dialogue entre les différents acteurs de la filière, et permettra une meilleure appréhension des scénarios qui ne manqueront pas d'apparaître en fonction des nouvelles contraintes technico-économiques.

### **Bibliographie**

Brisson N., 1998. STICS APC. Document interne, 41pp. + annexes

Brisson N., Dorel M. et Ozier-Lafontaine H., 1998.- Effects of soil management and water regime on the banana growth between planting and flowering. Simulation using the STICS model. Acta Hort., 490, 229-238.

Brisson et al., en préparation. Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parametrisation.

Estevez, B., Domon, G., Lucas, E., 2000. Contribution de l'écologie du paysage à la diversification des agrosystèmes à des fins de phytoprotection. Phytoprotection, 81 (1) : 1-14.

Schroth G., Krauss U., Gasparotto L., Duarte Aguilar J.A., and Vohland K., 2000. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. Agroforestry Systems, 199-241.

## Vers une modélisation de la nuisibilité quantitative et qualitative des maladies aériennes du blé en interaction avec les facteurs de production

M-O Bancal, C.Robert (INRA E.G.C. Grignon), C.Lannou (INRA Pathologie Végétale, Grignon)

### Introduction

Selon Boote et al (83), la prédiction des pertes de rendement nécessite de déterminer les fonctions physiologiques affectées par les pathogènes puis de quantifier pour chacune d'elles les relations entre symptômes et dommages; selon ces auteurs, les interactions avec le fonctionnement général de la plante se fera à travers l'introduction de telles relations dans les modèles de fonctionnement des plantes saines. Les interactions entre facteurs biotiques et abiotiques, importantes en particulier pour la mise au point de méthodes de lutte alternatives, passent également par le modèle, les différents facteurs étant introduits de manière additive. Néanmoins, Ayres (91), Johnson et Teng (1992) et Pinschmidt et al (1999) soulignent que les effets ne sont pas toujours additifs et que des compensations entre organes et/ou plantes au sein du couvert peuvent se produire; ainsi Ayres (1991) montre que les facteurs biotiques et abiotiques peuvent modifier différemment le rapport  $MS_{aérien}/MS_{racinaire}$ , aboutissant à des déséquilibres différents entre absorption d'azote et bilan de carbone. En conséquence, à l'heure où les critères qualitatifs (%protéines en particulier) jouent un rôle de plus en plus important dans les échanges commerciaux, il devient primordial d'analyser, quantifier et modéliser les effets des maladies des cultures en interaction avec les facteurs de productions ( en particulier l'azote). C'est pourquoi nous avons entrepris une démarche analytique des effets du complexe aérien fongique du blé, à l'origine des plus importantes et fréquentes pertes de rendement dans le Nord de l'Europe, en interaction avec l'état de nutrition azotée des plantes, sur le rendement et la % protéines des grains.

### Démarche

Quoique établie sur un domaine de validité restreint (une variété, une date de semis, un seul site géographique qui implique des maladies en période post-floraison, variabilité des apports d'azote le plus souvent tardifs et de la densité de semis), nous faisons l'hypothèse que la grille de lecture (figure 1) que nous avons mise au point, peut être appliquée à une large gamme d'interactions entre facteurs biotiques et abiotiques, moyennant la quantification séparée des effets d'une maladie. La démarche consiste à séparer les effets des facteurs de production de l'itinéraire technique (azote, variété, date et densité de semis) sur (1) la structure du couvert d'une part, puis sur (2) l'état de nutrition ou de fonctionnement des organes cibles des pathogènes (feuilles, tiges, épis). Ces deux variables intermédiaires de fonctionnement du couvert vont ensuite interagir à différentes étapes du cycle des pathogènes : (1a) la structure en tant que barrière physique sur la dispersion spatiale des spores et donc sur la vitesse de l'épidémie (Savary et al,1995), (1b) la structure, par sa modification du microclimat dans le couvert, sur la vitesse de déroulement des cycles (l'humidité relative sur le taux de réussite de l'infection et la température, sur la vitesse de déroulement d'un cycle), (2a) l'état de nutrition de l'organe cible peut modifier les différentes étapes du cycle épidémique (Tiedemann, 1996), en particulier l'intensité et la durée de la sporulation, et (2b) l'état de nutrition des tissus malades, pourrait, comme le suggèrent Zuckermann et al (1997), modifier la réponse physiologique de l'hôte, pour une même sévérité de maladie, ce que l'on peut appeler tolérance physiologique.

### Expérimentations-Modélisation.

Afin de répondre à ces objectifs, deux types d'expérimentations complémentaires ont été mis en place (Tableau 1) : ① des expérimentations *en conditions contrôlées* sur plantules et plantes adultes. Grâce à la maîtrise des gammes d'infection, il s'agissait de quantifier et hiérarchiser les effets physiologiques des deux maladies, inoculées séparément, à l'échelle de la feuille et de la plante. ② des expérimentations *au champ*, sur 6 ans. Des suivis de peuplements soumis à des épidémies naturelles modulées par les facteurs variétaux, nutritionnels (fertilisation azotée) et micro climatiques (température et humidité de l'air) ont été réalisés pour évaluer l'extrapolation possible des effets physiologiques mesurés à l'échelle foliaire en ① à celle du couvert. La figure 2 montre les principaux effets des maladies sur les différents mécanismes physiologiques pris en compte à l'échelle foliaire; ils ont été mesurés et modélisés. Leur intégration à l'échelle du couvert est réalisée selon les formalismes conjugués de Bastiaans (1993) et Béasse et al (2000) en fonction des profils verticaux de LAI, de gLAI et de maladies pour le bilan de carbone. Les perturbations des flux d'azote dans la plante par les maladies foliaires, quoique souvent constatées (Garry et al, 1997; Dimmock & Gooding, 2002) n'ont

jamais fait l'objet d'une modélisation; elles nécessitent une modification de la structure existante des modèles de fonctionnement des couverts qui modélisent la sénescence naturelle en fonction de la diminution de l'azote foliaire pour le remplissage des grains. Ce formalisme n'est plus valide dans le cas des maladies foliaires qui, du fait de la sénescence accélérée qu'elles induisent provoquent un blocage prématuré de l'azote dans les feuilles. Dans notre cas, c'est donc la sénescence accélérée de feuilles malades qui pilote les flux d'azote hors des feuilles et est intégré dans un modèle C/N classique de fonctionnement du blé en période post-floraison issu de la bibliographie antérieure (Girard, 1997; Sinclair & Amir, 1992 ; Asseng *et al*, 2002).

### Résultats **Discussion**

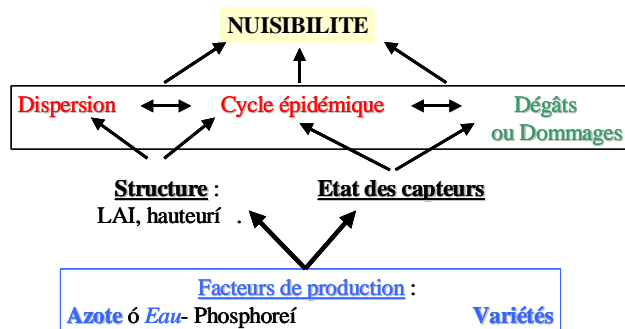
#### *Validation de la démarche par les expérimentations à l'échelle foliaire*

La [figure 3](#) illustre l'intérêt pour la modélisation future de séparer l'action des facteurs de production sur les différentes étapes de l'épidémie et sur les différentes fonctions physiologiques affectées. Ainsi, pour la rouille brune, l'azote foliaire modifie principalement la sporulation ([fig3a](#)) et peut-être légèrement l'efficacité de l'infection (non montré) ce qui ne se traduit à l'échelle du couvert par des différences d'épidémies importantes ([fig3c](#)), mais peut constituer une perte de matière différente pour le couvert, alors que la diminution de photosynthèse des feuilles ne varie pas avec la %N des feuilles, à même sévérité ([fig3b](#)); par contre une forte variation de structure du couvert aboutissant à des %N similaires modifie fortement la dynamique épidémique ([fig3c](#)). En conséquence, si les dommages sont légèrement affectés par la %N des feuilles à travers la sporulation, l'effet majeur de la fertilisation azotée passe par la variation de structure qu'il provoque. La même étude réalisée sur la septoriose montre également que les modalités de l'interaction peut varier avec le pathogène considéré, ce qui peut conditionner l'évolution d'un complexe parasitaire au champ.

#### *Intégration des interactions à du couvert : vers une modélisation de la nuisibilité quantitative et qualitative*

L'intégration par strate des effets du complexe parasitaire "rouille brune-septoriose" sur la photosynthèses et la sénescence foliaires a été appliquée aux épidémies naturelles observées en 1999 sur la variété Soissons avec ou sans apport tardif d'azote et sur la variété Récital. Nous avons fait l'hypothèse d'une absence d'interactions entre maladies, excepté le fait que la septoriose arrête le cycle de la rouille brune qu'elle recouvre. Les pertes par sporulation ont été négligées dans un premier temps. On constate [figure 4](#) que le modèle prédit relativement bien les pertes de croissance observées dans ces 3 situations, malgré une sous-estimation de la nuisibilité pendant la période de sporulation active de la rouille brune (de 100dj à 300dj). Ceci constitue une première validation indirecte des effets à l'échelle foliaire et de la démarche entreprise, qu'il convient de poursuivre sur une gamme élargie de variation des épidémies, de gestion des couverts et de conditions climatiques.

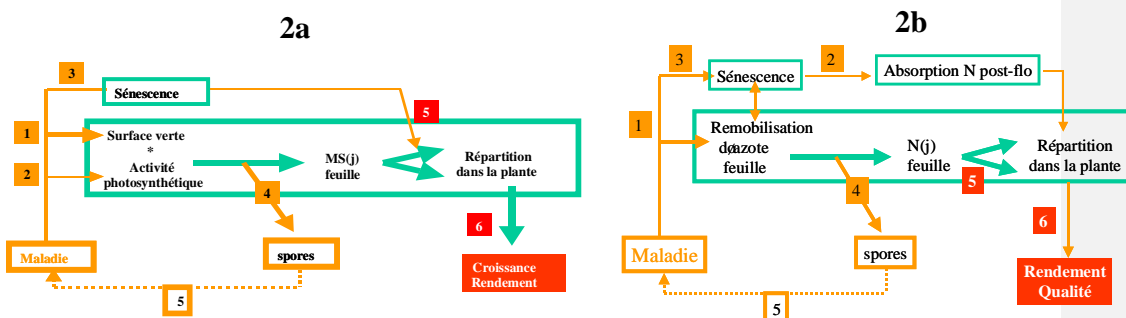
L'intégration par strate des effets du complexe parasitaire "rouille brune-septoriose" sur la remobilisation de l'azote impose plusieurs hypothèses sur le fonctionnement azoté des plantes saines et malades vérifiées dans la littérature ou nos expérimentations : (1) l'azote absorbé est prioritairement alloué aux grains; (2) l'azote relatif à la floraison des différentes strates foliaires varie comme l'azote total relatif à la floraison des feuilles; (3) chez les plantes malades seul l'azote non-structural des parties vertes est disponible pour le remplissage des grains. Sur ces principes très simples, nous avons construit un modèle de fonctionnement azoté des plantes malades avec les surfaces foliaires malades et mortes ainsi que l'absorption post-floraison comme variables d'entrée ([figure 5](#)). Une première analyse du comportement du modèle à l'augmentation des surfaces atteintes montre que quand l'absorption de l'azote post-floraison n'est pas affectée, les teneurs en azote des grains sont plus élevées, ce qui est conforme à nos données expérimentales ([fig 5b](#)). Cependant, Dimmock & Gooding (2002) dans leur synthèse bibliographique, notent que les maladies foliaires du blé mènent soit à une augmentation soit à une diminution de la %N des grains; dans nos expérimentations, une diminution de %N des grains a été trouvée la seule année où l'absorption d'azote post-floraison était affectée par un scénario plus précoce de maladies (non montré). Cette remarque pose de nombreuses questions encore sans réponse pour la modélisation du fonctionnement C/N des peuplements de blé malades : A partir de quel niveau de maladie l'absorption d'azote est-elle diminuée ? La conséquence en est-elle toujours une tendance à la diminution de la teneur en protéines des grains ? Quelle variable de fonctionnement du couvert est-elle la mieux liée à ces variations d'absorption : la surface verte ? la photosynthèse du couvert ? la satisfaction ou non par la photosynthèse et les réserves de la demande en MS des grains ?



**Figure 1** : Grille d'analyse des effets de maladies foliaires en interaction avec les facteurs de production

Année	Epidémies naturelles	Expérimentations au Champ		Conditions Contrôlées	
		Facteurs de variation de l'expérimentation	Objectifs	Facteurs de variation	Objectifs
1995	Rouille brune précoce	Fongicide, 1 var Soissons	Indicateurs de fonctionnement de la feuille malade : PS, fluorescence, conductance, azote, %eau, % chl-a (1), croissance du couvert		
1996	Rouille brune Très tardive	Fongicide, 1 var Soissons	Surface malade (note et scanner) Croissance du couvert Redistribution C et N vers le grain, rôle des réserves (4)	Inoculations de rouille brune sur feuille drapeau (2)	Relations surface malade/photosynthèse, respiration etc (2)
1997	Rouille et septoriose précoces	Fongicide, variétés (Soissons, Sédéral), N tardif	(1) et (4)		
1998	Rouille et septoriose normales	Fongicide, variétés (Soissons, Réctal), N tardif	(1) et (4)		
1999	Rouille et septoriose très précoces	Fongicide, variété (Soissons, Réctal), N tardif, brunisation	(1) et (4)	Inoculation de plantules par la rouille brune (3)	Cinétiques de sporulation, C et N exportés (3)
2000				<i>Inoculations de septoriose sur feuille drapeau</i> Idem (3)	Idem (2) Idem (3)
2001	Rouille et septoriose précoces	Fongicide, variétés (Soissons) Densité * N précoce N tardif	(1) et (4) Séparer effets structure et azote	<i>Inoculations de septoriose et rouille sur feuille drapeau</i>	Idem (2) Idem (3)

**Tableau 1** : Récapitulatif des expérimentations menées sur 6 ans à Grignon



**Figure 2** : Fonctions physiologiques affectées par les maladies foliaires aériennes (a) jouant dans le bilan de carbone et (b) conditionnant l'acquisition et la répartition de l'azote

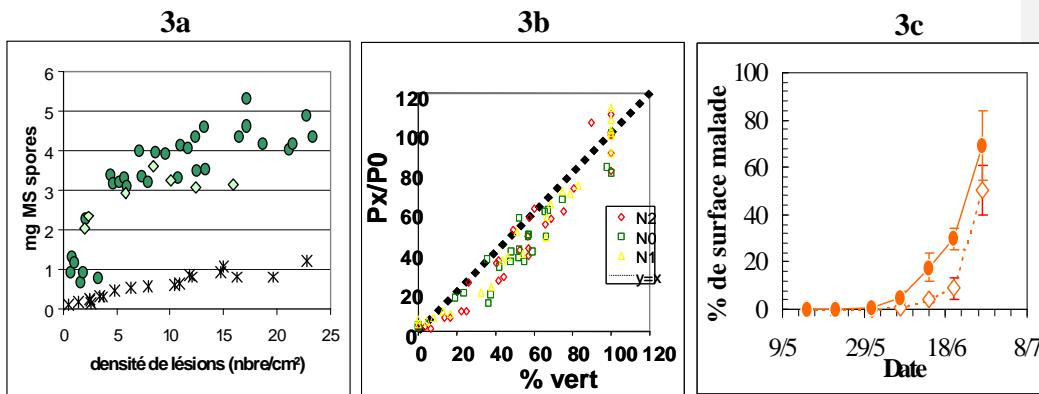


Figure 3 : Analyse des effets de l'azote sur la nuisibilité et les dynamiques épidémiques. (a) production de spores sur des feuilles à forte (◆) et faible (×) teneur en azote. (b) réponse de la photosynthèse relative à la sévérité de maladie en fonction de l'état de nutrition azotée des feuilles (N0, N1, N2). (c) dynamique épidémique de la rouille brune au champ pour une même structure de peuplement et des %N variables (◆) et pour des structure de couvert différentes (♦ forte densité, ◇ faible densité) à même teneur en azote des feuilles.

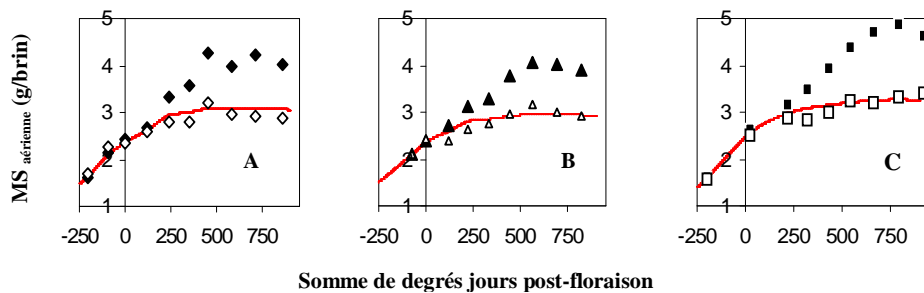


Figure 4 : Simulation (—) de la croissance des plantes malades (symboles vides) relativement à celles des plantes saines (symboles pleins) pour (A) variété Soissons en conditions optimales de nutrition azotée, (B) cv Soissons en conditions sub-optimales de nutrition azotée, (C) cv Récital en conditions optimales de nutrition azotée (Grignon, 1999).

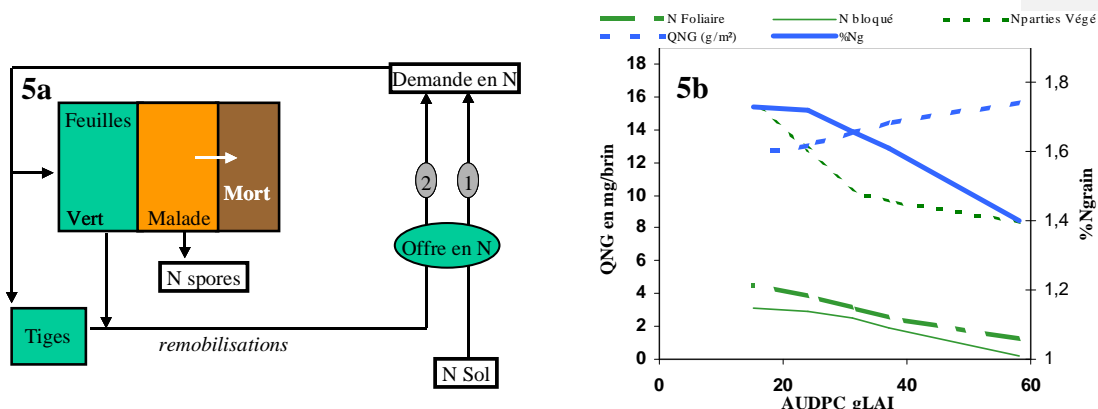


Figure 5 : Prise en compte de l'effet des maladies foliaires sur la redistribution de l'azote. (a) schéma conceptuel ; (b) simulation des effets d'une diminution du gLAI sur le remplissage des grains en N et la %N des grains et sur l'évolution de l'azote des parties végétatives (l'absorption est supposée constante).

#### Bibliographie

- Ayres, P. G. (1991).** Growth responses induced by pathogens and other stresses. *in Response of plants to multiple stresses*. H. A. Mooney, Winner, W.E., Pell, E.J. London, Academic Press. pp 227-283.
- Bastiaans, L. (1993).** Understanding yield reduction in rice due to leaf blast. Theoretical production ecology. Wageningen, Wageningen Agricultural University.
- Beasse, C., Ney, B., Tivoli, B. (2000).** "A simple model of pea (*Pisum sativum*) growth affected by *Mycosphaerella pinodes*." Plant Pathology **49**: 187-200.
- Boote, K. J., J.W. Jones, Mishoe J.W. and R.D. Berger (1983).** "Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions." Phytopathology **73**(11): 1581-1587.
- Dimmock, J.P.R.E. and Gooding, M.J. (2002).** The influence of foliar diseases and their control by fungicides on the protein concentration in wheat grains : a review. Journal of Agricultural Science **138** : 349 6 366.
- Garry, G., B. Tivoli, et al. (1996).** "Effects of *Ascochyta* blight by *Mycosphaerella pinodes* on the translocation of carbohydrates and nitrogenous compounds from the leaf and hull to the seed of dried-pea." Plant Pathology **45**: 769-777.
- Girard, M.-L. (1997).** Modélisation de l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains de blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.); simulation de leur teneur en protéines à la récolte, INA-PG, INRA.
- Johnson, K. B. and P. S. Teng (1990).** "Coupling a disease progress model for early blight to a model of potato growth." Phytopathology **80**(4): 416-425.
- Pinnschmidt, H. O., W. D. Batchelor, et al. (1995).** "Simulation of multiple species pest damage in rice using CERES-rice." Agricultural systems **48**: 193-222.
- Savary, S., N.P. Castilla, F.A.Elazegui, C.G. McLaren, M.A. Ynalvez and P.S. Teng (1995).** "Direct and indirect effects of nitrogen supply and disease source structure on rice sheath blight spread." Phytopathology **85**(9): 959-965.
- Sinclair, T. R. and J. Amir (1992).** "A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat." Field Crop Res **30**: 63-78.
- Tiedemann, A. V. (1996).** "Single and combined effects of nitrogen fertilization and ozone on fungal leaf diseases on wheat." J. of Plant Diseases and Protection **103**(4): 409-419.
- Zuckerman, E., A. Eshel, et al. (1997).** "Physiological Aspects Related to tolerance of Spring Wheat Cultivars to *Septoria tritici* Blotch." Phytopathology **87**(1): 60-65.

## **Adaptation of the model STICS to intercropping and Agroforestry systems**

N. Brisson<sup>47</sup>, R. Tournebize<sup>2</sup>, F. Bussière<sup>2</sup>, M. Ghiloufi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Unité Climat, Sol et Environnement - INRA  84 914 Avignon France

<sup>2</sup> Unité Agropédoclimatique de la zone cara be  INRA   97170 Petit Bourg France

<sup>3</sup> Unité Agronomie   INRA- 78 850 Grignon France

### **Introduction**

Intercropping and agroforestry consists in growing several crops (annual or perennial) simultaneously, each crop developing and growing with its own rhythm resulting from the resource partitioning. This practice is traditional in the tropics and starts to be used under temperate climates for environmental purposes. Given the complexity of the system, crop models can be especially helpful to analyse comprehensively intercropping (Caldwell, 1995). This work describes the adaptation of the model STICS to this agronomical issue. We tried to be as simple as possible in order to keep the operational qualities of STICS (Brisson et al., 1998). Three examples are presented, illustrating three agronomic systems: maize/annual legume, wheat/fescue, tropical legume shrub/forage grass.

### *Theory*

The described system being complex, some simplifying hypotheses are adopted. The soil-plant-atmosphere system is divided into three sub-systems at the canopy level: the dominant canopy and the understorey canopy with its shaded part and its sunlit part, each of them being defined by a light microclimate. Those light microclimates, estimated from a radiative balance (Brisson et al., 1999), drive the differential behaviours of the sub-systems in terms of growth (dry matter accumulation, LAI) and water and nitrogen budgets (transpiration, nitrogen uptake, stress index). The estimation of the water requirements for both crops relies on light partitioning coupled to a resistive scheme similar to the one proposed by Wallace (1995) and applied at a daily time step. The phasic development is considered the same for both parts of the understorey crop. Also the soil environment is assumed the same for both crops, that is to say that the horizontal differentiation within the soil profile is neglected in front of the vertical one. It is assumed that the interactions between both root systems result from the influence of the soil on each crop root profile through its water content dynamics.

The application of this theory within the code of the model STICS is done by multiple calls to the elementary subroutines and re-affectation of the state variables as a function of the considered sub-system. Only few specific modules

were added to the version documented in Brisson et al. (1998), which concern radiative budget, water requirements, rainfall interception by the canopy and dynamics of the root system as influenced by soil status.

### Validation

Two experiments are presented for a quantitative validation : a maize-canavalia intercrop grown in the French West Indies (Fig. 1) and wheat-fescue intercrop grown in the Paris Basin (Fig. 2) . In both cases the crops were sown simultaneously but the objectives were different : in the first case study, intercropping aimed at taking advantage of the association between leguminous and non leguminous to optimise the available resources while in the second case study the objective is to extend the period of soil cover to limit nitrates lixiviation, without decreasing the yield of the wheat crop.

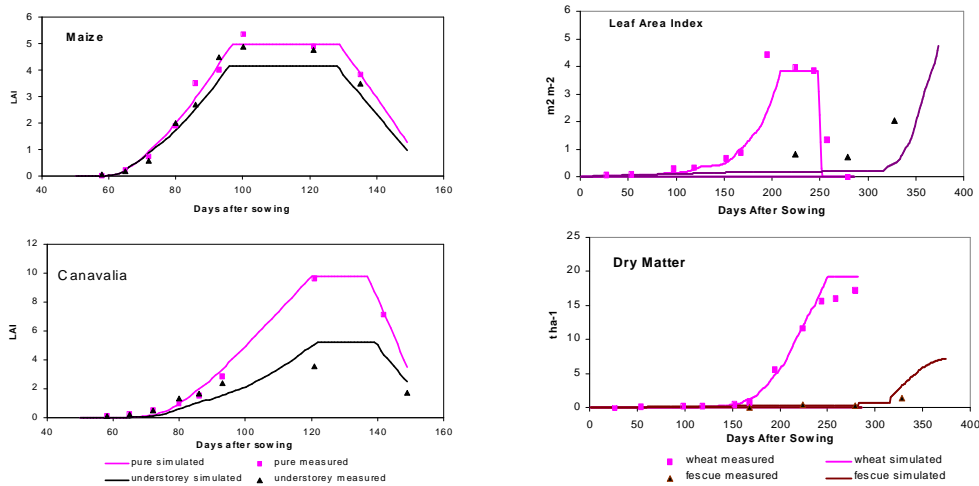


Fig. 1 Comparison between LAI developed by the two components of the maize-canavalia intercrop and their equivalent in pure crop.

Fig 2 LAI and dry matter of the two components of the wheat-fescue intercrop



The Fig.1 shows that the model reproduces satisfactorily the decrease of the LAI for both companion crops, as compared to the equivalent pure crops. For the understorey crop (Canavalia) the reduced incident radiation explains the reduction of the LAI and the resulting decrease of yield (4.55 tha<sup>-1</sup> for the pure crop and 1.15 tha<sup>-1</sup> for the intercrop). For the dominant crop competition for soil water is the main responsible for lower LAI and yield (6.9 tha<sup>-1</sup> for pure and 5.46 tha<sup>-1</sup> for intercrop given that the water stress indices are respectively equal to 100 and 87% of the total requirements). The Fig.2 shows that the model tends to exaggerate the role of the wheat crop as a shelter for the understorey fescue, at least for the LAI growth. However the simulated dry matter seems correct. The model reveals that the competition would mainly concern nitrogen absorption (nitrogen nutrition index for fescue less than 0.4).

Beside those quantitative results, we also purpose to simulate the results from Cruz et al. (1995) concerning the improvement of the forage quality of a tropical grass crop when it is grown in intercrop with a shrub legume. When running the model in similar conditions of soil, climate, the results (Table 1.) show a significant increase in the nitrogen content of the grass. This increase cannot be simply explained by a dilution effect but also by the water stress effect and its consequence on the availability of the soil nitrogen for plants.

	<i>Yield (t ha<sup>-1</sup>)</i>	<i>Transpiration n (mm)</i>	<i>Nitrogen concentration (%)</i>
<i>Forage grass (pure crop)</i>	<i>20.3 (31.1)</i>	<i>78(264)</i>	<i>2.20 (1.41)</i>
<i>Leguminous shrub</i>	<i>7.4</i>	<i>107</i>	<i>3.48</i>

Table 1 : Simulated results of a tropical legume shrub/forage grass intercrop as compared to the pure forage grass crop

### References

- Brisson et al., 1998, Agronomie
- Brisson et al., 1999 Leida
- Cruz et al., 1995, In "Ecophysiology of tropical intercropping" 285-294
- Wallace, 1995, In "Ecophysiology of tropical intercropping" 153-162
- Caldwell, 1995, In "Ecophysiology of tropical intercropping" 353-368

## Elements pour le paramétrage du module levée de STICS et de l'allongement racinaire

Carolyne Dürr

INRA Unité d'Agronomie Laon-Reims-Mons 02007 Laon Cedex France

Le module levée de Stics requiert de donner les valeurs des paramètres de la fonction l'allongement de l'épi- ou hypocotyle. Nous avons établi dans le cadre de plusieurs projets les valeurs de ces paramètres sur plusieurs espèces de mono- et dicotylédones (blé, betterave, lin, carotte, colza, moutarde, RGL1). Dans le même temps, nous avons aussi mesuré les allongements des racines séminales présentes dans l'embryon. Le regroupement de ces travaux nous permet de comparer les valeurs obtenues pour les différentes espèces et variétés étudiées. Il permet aussi de comparer les valeurs de vitesse d'allongement racinaire obtenues à celle données pour ces mêmes plantes au stade adulte (paramètre *croirac*). Il en ressort que sous réserve d'exprimer le temps en temps thermique calculé à l'aide de la base appropriée à l'espèce, les variations de l'allongement de l'épi- ou hypocotyle sont relativement limitées, y compris entre espèces. Les valeurs mesurées pour les vitesses d'allongements racinaires sont de même ordre de grandeur que celles données pour des stades adultes sur les mêmes espèces. On disposerait donc d'un moyen assez rapide et facile à mettre en œuvre pour établir le paramètre *croirac*.

## **Etalonnage du modèle STICS pour une culture de blé en condition semi-aride (Vallée de Yaqui, Nord-Mexique)**

R. Hadria(1), J-C. Rodriguez(2), B. Duchemin(3), A. Lahrouni(1), S. Khabba(1), C. Watts(2), G. Chehbouni(3)

(1) FSSM : Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi ayad, Maroc

(2) IMADES: Instituto del Medio Ambiente y el Desarrollo Sustentable IMADES, Mexique

(3) CESBIO: Centre d'Études Spatiales pour la BIOSphère, France

**Correspondant : [r.hadria@ucam.ac.ma](mailto:r.hadria@ucam.ac.ma)**

### **I- Introduction**

Le modèle STICS est un modèle dynamique de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Son objectif principal est de simuler les effets liés au climat, au sol et à la plante sur la production et sur l'environnement (Brisson et al., 1998). Dans le but de tester la capacité de ce modèle à reproduire la croissance de cultures de blé en milieu semi-aride, nous avons analysé certaines grandeurs comme l'indice foliaire (LAI), le rayonnement net et l'évapotranspiration réelle. Ces grandeurs ont été choisies en raison de leur importance dans le calcul de bilan hydrique. Cette étude a été conduite à partir d'un jeu de données acquises dans la vallée Yaqui, état de Sonora, Nord-Mexique. On présente ici un premier étalonnage du modèle qui a permis d'obtenir un accord satisfaisant entre les grandeurs mesurées et simulées.

### **II- Matériel et méthode**

#### **II-1- Données**

Les données climatiques nécessaires pour le fonctionnement du modèle STICS sont tirées des mesures réalisées in situ durant l'expérience Yaqui 1999/2000. Cette expérience a été réalisée par une équipe de l'IRD au Mexique durant la saison agricole 1999/2000. Elle s'inscrit dans le cadre du projet d'irrigation d'une vallée semi aride située au nord-ouest de Mexico (état de Sonora) où la gestion de l'eau est un enjeu majeur pour la production agricole. Dans ce contexte, la campagne de mesure menée par A.Chebouni de l'IRD, J.C. Rodriguez et C. Watts de l'IMADES (équivalent de l'IRD au Mexique) avait pour objet d'étudier les flux de chaleur et de masse au sommet d'une parcelle de blé. Cette parcelle a été semée le 10 décembre 1999. Des mesures semi-horaires ont été effectuées pour les variables météorologiques (intensité et direction du vent, pluie, température et humidité de l'air, rayonnement incident) et les composantes du bilan énergétique (flux de chaleur latente et sensible, flux dans le sol, rayonnement net). De plus, des relevés moins systématiques ont permis de suivre le développement de la culture (mesure de réflectances à différentes longueurs d'onde en particulier). Le NDVI déduit de ces dernières nous a permis d'estimer l'indice foliaire (LAI) du couvert végétal par l'inversion de l'équation proposée par Asrar et al. (1984).

#### **II-2- Options de simulation et 1<sup>ère</sup> identification des paramètres d'entrée**

L'utilisateur du modèle STICS a le choix entre plusieurs options de calcul. Le tableau 1 regroupe les options de simulation que nous avons choisies. Parmi les paramètres généraux, nous avons modifié les deux paramètres (AANGST et BANGST) de l'équation d'Angstrom utilisée pour calculer la durée d'insolation et qui dépendent de la latitude du lieu. Pour la vallée de Yaqui, les valeurs enseignées pour AANGST et BANGST sont respectivement 0.31 et 0.46 (Brutsaert 1982). Le sol est très argileux (48% d'argile, voir Jose Luis Avila et al., 1982). Ses différentes caractéristiques sont résumées dans le tableau 2. Les indications fournies par J.C. Rodriguez ont permis de décrire la phénologie de la culture ainsi que son itinéraire technique. Trois apports d'eau et deux apports d'azote ont été appliqués durant l'expérience (Hoedjes et Zuurbier, 2000).

Tableau 1- Les principales options choisies pour notre simulation

Rayonnement grande longueur d'onde	Formule de Brutsaert
Interception du rayonnement	Loi de Beer
Température de la culture	Bilan d'énergie
Besoin en eau des plante	Approche résistive
Stress hydrique et azoté	actifs

Tableau 2- Caractéristiques du sol dans la vallée de Yaqui.

Paramètre	Valeur
<b>Humidité à la capacité au champs (HCCF)</b>	<b>entre 34.6% et 35.4%</b>
<b>Humidité au point de flétrissement (HMINF)</b>	<b>entre 16.8% et 17.8%</b>
<b>Densité apparente (DAF)</b>	<b>entre 1.35 et 1.43%</b>
<b>Teneur en argile (Arg)</b>	<b>48%</b>
<b>PH</b>	<b>7.90</b>
<b>Albédo de la surface à l'état sec</b>	<b>0.17</b>
<b>Paramètre d'évaporation du sol nu q0</b>	<b>12 mm</b>

### III- Résultats et discussions

L'indice foliaire joue un rôle majeur dans le bilan de carbone dans le modèle STICS. Nous avons donc essayé dans un premier temps de restituer cette variable. Cela a été fait par forçage des stades phénologiques et ajustement des paramètres cités dans le tableau 3. La figure 1 présente l'évolution de LAI en fonction des jours de simulation. Si on exclue le début et la fin du cycle de développement de la culture, on pourrait conclure que les résultats de simulation du LAI sont en bon accord avec les données déduites des mesures de réflectances.

Après ajustement de l'indice foliaire, on constate une sous-estimation du rayonnement net par le modèle (Figure 3). De ce fait, on a décidé d'examiner séparément les différentes composantes du bilan. Pour améliorer la composante rayonnement net courte longueur d'onde, on a remplacé la valeur de l'albédo de végétation, ALBVEG=0.23, proposée par Ritchie (Brisson,2002) par une autre valeur déduite des mesures expérimentales. Après renseignement d'une valeur de 0.21, l'accord observé entre observation et simulation est remarquable (figure 4). Le biais observé sur la figure 3 est principalement lié au calcul de la température de la culture : on remarque que le modèle surestime les valeurs mesurées, d'environ 3°C en moyenne (figure 5).

La figure 6 présente l'évolution temporelle de l'évapotranspiration réelle (variable critique en condition semi-aride) simulée et mesurée. On constate que dans l'ensemble, le modèle reproduit de façon satisfaisante les valeurs mesurées. Cependant, une sous-estimation non négligeable des valeurs observées est obtenue lorsque le LAI est inférieur à 0.7. Ces valeurs correspondent au début et à la fin du cycle, période pendant laquelle la restitution du LAI semble la moins satisfaisante (voir figure 1).

Tableau 3- valeurs des paramètres d'entrée du modèle STICS avant et après calibration

Paramètre	Valeur par défaut	Valeur enseignée
<b>DLAIMAX</b>	<b>0.00032</b>	<b>0.00014</b>
<b>LAICOMP</b>	<b>0.304</b>	<b>0.050</b>
<b>ADENS</b>	<b>-0.6</b>	<b>-0.3</b>
<b>UDLAIAMAX</b>	<b>3</b>	<b>2.8</b>

Pour tester la capacité de STICS à reproduire les effets du stress hydrique sur la croissance, nous avons analysé deux scénarii supplémentaires : sans irrigation avec des conditions initiales humide (sol rempli à 50% de la réserve utile sur toute la profondeur) ou sèche (horizon de surface de 20 cm rempli à 50% de la réserve utile, humidités des horizons inférieurs au point de flétrissement). Ces deux scénarii conduisent à des évolutions de l'indice foliaire cohérentes par rapport à la première simulation (figure 1), avec un effet du stress hydrique peu ou très marqué selon les conditions initiales de humidité du sol. L'évolution de la humidité de l'horizon de surface apparaît également réaliste : décroissance progressive dans le cas non irrigué, trois pics correspondant au jours d'apport dans le cas irrigué (figure 2). La hiérarchie des conditions de stress est également respectée au niveau de l'évapotranspiration (figure 6). Les résultats de cette étude comparative apparaissent encourageants et semblent confirmer la capacité du modèle STICS à simuler des cultures de blé en condition semi-aride.

### Remerciements

La réalisation de cette étude a été fondée sur les données acquises durant l'expérience Yaqui durant la saison 1999/2000. de cette occasion, nous remercions tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette campagne de mesure et surtout l'institution CONACYT, Mexico qui a financé cette dite expérience. Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué soit du proche soit du loin à la réalisation de ce travail.

### References

- Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L., *Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomie 76 (1984): 300-306.*
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud 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., Delécolle R., *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 (1998) 311-346.*
- Brisson N., *STICS version 5.0 : notice concepts et formalismes. INRA, (2002), 74 p.*
- Brutsaert W., *Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications. Kluwer academic publishers. (1982). 299 p*
- Hoedjes J.B.C. et Zuurbier R.M., *Measuring surface fluxes over an irrigated wheat field using a large aperture scintillometer and determination of universal functions using structure parameter and variance methods. Thesis of traineeship at IMADES and ITSON, Wageningen university. (2000), 51 p.***
- Jose Luis Avila A., Jose Eliseo Ortiz A., F. Jose Siqueiros B., *Evaluacion de 6 calendarios de riego en la produccion de sorgo forrajero para ensilaje, en el valle del yaqui. (Suelos de Barrial). Reporte tecnico de sorgo forrajero. (1982)***

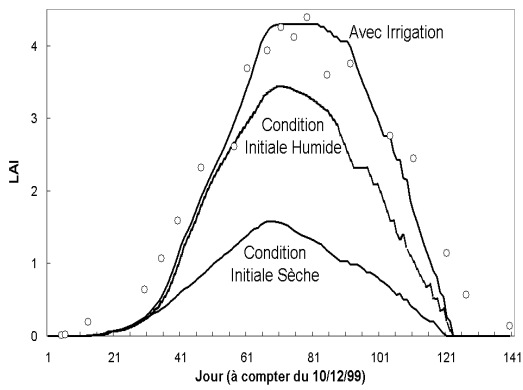


Figure 1. Evolution temporelle de l'indice foliaire simulé (traits) et inversé à partir des réflectances (cercles)

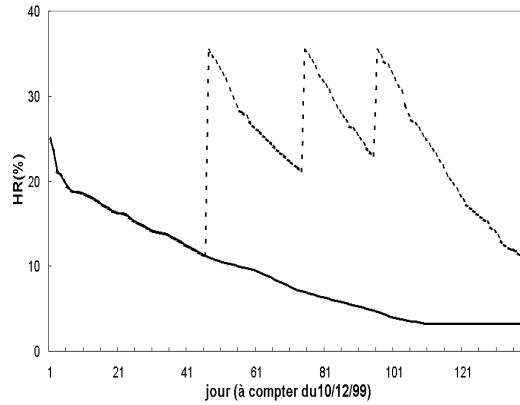


Figure 1. Evolution de l'humidité de la première couche du sol : sans irrigation (trait continu) et avec irrigation (trait discontinu).

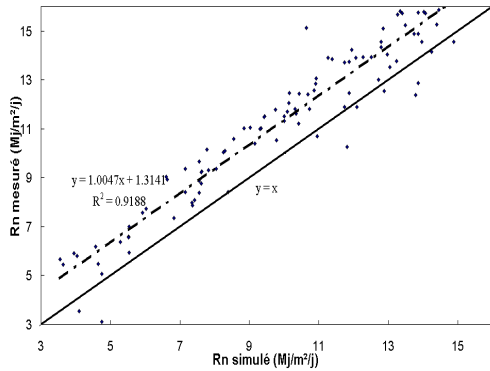


Figure 3. Le rayonnement net mesuré en fonction du rayonnement net simulé par STICS

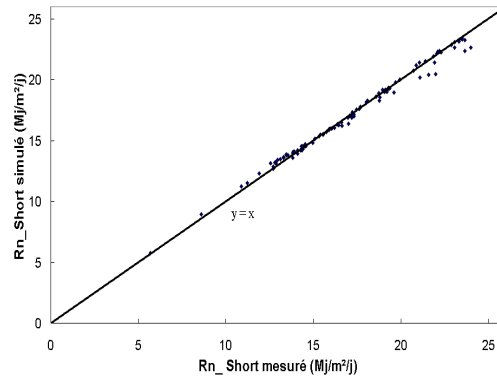


Figure 4. Le rayonnement net courte longueur d'onde simulé en fonction du rayonnement net courte longueur d'onde mesuré.

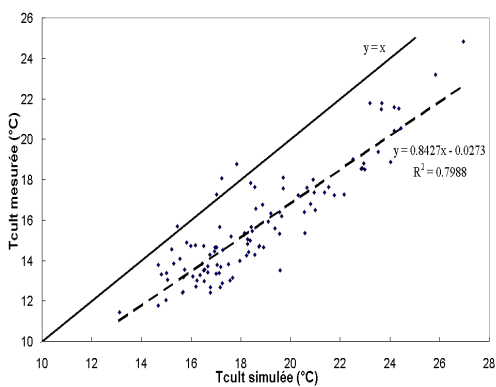


Figure 5. La température de culture mesurée en fonction de celle simulée par le modèle STICS

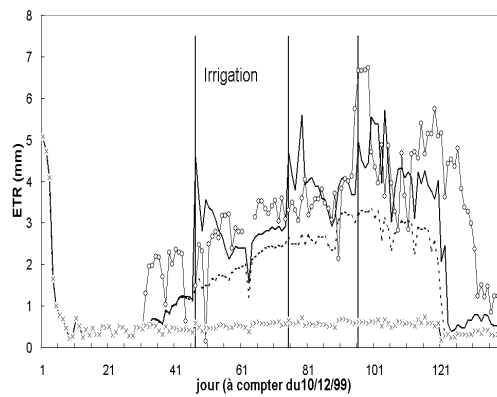


Figure 6. Variation de l'évapotranspiration réelle mesurée (cercles), avec irrigation (trait continu), en condition initiale humide (trait discontinu) et en condition initiale sèche (étoiles).

## STICS et Mauvaises Herbes : Quel avenir commun ?

MUNIER-JOLAIN N.M.

*INRA, Unité de Malherbiologie et Agronomie,  
BP 86510, 21065 Dijon Cedex*

L'équipe « Systèmes de culture et mauvaises herbes ou Protection Intégrée » de l'Unité de Malherbiologie et Agronomie de Dijon a comme objectifs (i) d'analyser et de comprendre les effets des systèmes de culture sur les infestations de mauvaises herbes et (ii) de concevoir de nouvelles méthodes, de nouvelles techniques et de nouveaux systèmes de culture contribuant à améliorer la maîtrise des mauvaises herbes des grandes cultures, en particulier dans le cadre de systèmes respectueux de l'environnement, limitant les impacts négatifs liés aux traitements herbicides.

Les déterminants de l'évolution des infestations de mauvaises herbes sont des systèmes très complexes, du fait de la diversité des espèces et de leurs caractéristiques biologiques, et de la diversité des facteurs agronomiques et climatiques agissant sur les processus biologiques en jeu (dormance, germination, levée, mortalité de plantule, croissance et production de semences). Face à cette complexité, les recherches que nous conduisons relèvent de deux approches complémentaires :

- **La modélisation des effets cumulatifs des pratiques culturales et des états du milieu induits sur l'évolution démographique des populations.**

Une **version monospécifique** du modèle est en cours de développement depuis plusieurs années (Nathalie Colbach, Bruno Chauvel) ; l'espèce « vulpin » (graminée automnale très fréquente dans les céréales semées en automne) a été choisie comme espèce-modèle. Il s'agit d'un modèle mécaniste, déterministe, à pas de temps journalier, qui a principalement un objectif de recherche pour la compréhension des processus et des interactions entre processus. Les variables d'entrée sont la quantité de semences présentes initialement dans chaque horizon du sol (1 cm d'épaisseur), le climat et les éléments caractéristiques du système de culture (dates et modalités du travail du sol, dates de semis, cultures semées). Le modèle simule chaque jour la position des semences dans le sol (en fonction du travail du sol), le nombre de semences germées, le nombre de plantules et de plantes aux différents stades de développement, le nombre de semences produites qui retournent à la surface du sol. Des itérations successives de plusieurs campagnes agricoles permettent de simuler l'évolution démographique de la population sur le long terme (figure 1). Au cours des dernières années, les modules « travail du sol et mouvement des semences dans le sol » et « germination-levée » ont été développés. Il reste à développer le module « production semencière » pour boucler le cycle biologique et permettre des itérations. A moyen terme, il est prévu d'intégrer un module spatiale pour simuler la répartition en tâches à l'intérieur de la parcelle, et un module « génétique de la résistance aux herbicides ».

Depuis début 2002, nous travaillons sur une **version plurispécifique** du modèle (Nicolas Munier-Jolain), qui reprend les principes de modélisation du modèle « vulpin » (modèle déterministe, pas de temps journalier), tout en étant plus simple pour (i) gagner en robustesse et surtout pour (ii) être paramétrable pour un grand nombre d'espèces de mauvaises herbes. Les paramètres biologiques requis pour les différentes espèces sont, par exemple, les niveaux de dormance en fonction de la période de l'année, les températures favorables à la germination, les effets des températures froides sur la mortalité, les durées des différentes phases phénologiques, les niveaux de production semencière de plantes isolées et les effets de la concurrence sur la réduction de cette production semencière. Le modèle simule la germination, la levée et le développement de chaque espèce de façon indépendante. L'interaction entre les espèces (culture comprise) est prise en compte uniquement pour l'estimation de la production semencière. Le modèle a été développé

d'abord sur Excel, puis sous C. Les premières simulations sont en cours de réalisation. Il restera un travail important de paramétrage et d'amélioration du modèle (nouveaux modules )

- **L'expérimentation de longue durée :**

Nous avons mis en place en 2000, avec la collaboration du Domaine de Dijon-Epoisses, un dispositif d'évaluation de systèmes de culture innovants, relevant de la Protection Intégrée contre les mauvaises herbes. 5 systèmes de culture ont été définis selon des contraintes et des objectifs contrastés. Des règles de décision adaptées pour maîtriser les infestations avec un recours limité aux herbicides sont mises en œuvre sur 2 parcelles de 2 ha par système (10 parcelles au total). Nous suivons les infestations de mauvaises herbes pour évaluer la performance malherbologique des systèmes. En 2002, nous avons réalisé une évaluation environnementale multicritère des différents systèmes avec des écobilans, en collaboration avec des collègues suisses. Ces écobilans ont mis en évidence l'importance des lixiviations de nitrates en terme d'impact environnemental (eutrophisation, mais aussi production de gaz à effets de serre NOx).

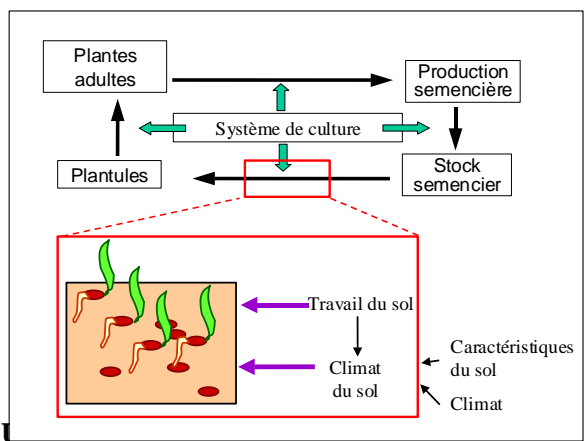


Figure 1 : représentation schématique du cycle biologique sur lequel sont fondés les modèles démographiques « mauvaises herbes ». En gros plan, détail des effets du travail du sol sur la position des graines dans le sol, des effets du climat du sol sur la germination, des effets de la profondeur d'enfouissement sur la date et la proportion de levée.

## STICS dans le cadre de nos recherches

Nous n'utilisons pas STICS actuellement. Cependant on peut imaginer 3 points pour lesquels il pourrait y avoir des relations entre STICS et nos travaux sur les mauvaises herbes :

### 1. Utilisation de STICS comme outil d'évaluation multicritère de systèmes de culture

La maîtrise des infestations de mauvaises herbes et les impacts environnementaux estimés des herbicides utilisés ne sont pas les seuls critères d'évaluation des systèmes de cultures que nous testons sur l'expérimentation de longue durée de Dijon-Epoisses. Il nous faut aussi quantifier les lixiviations de nitrate dans les différents systèmes. En l'absence de dispositif de collecte d'eau en profondeur, des simulations réalisées sous STICS constitue un moyen d'évaluer les systèmes pour ce critère. Ce sera en 2003 une partie du travail d'un stagiaire accueilli dans notre équipe.

### 2. Intégration, dans STICS, du modèle simulant l'évolution démographique des infestations plurispécifiques de mauvaises herbes

Certaines variables simulées dans STICS sont également utilisées dans les modèles démographiques que nous développons. C'est le cas par exemple :

- du microclimat du sol (température et humidité à différentes profondeurs), qui affecte les germinations de semences,
- de la surface foliaire de la culture, qui est prise en compte dans le module « concurrence » pour estimer la contribution de la culture à la « charge de concurrence globale » du peuplement plurispécifique, dont dépend la quantité de semences disséminées par un individu d'une espèce donnée.



Actuellement, ces variables sont modélisées dans la version Excel du modèle plurispécifique (avec des choix de modélisation dérivés de STICS), mais pas dans la version en C, pour laquelle se sont des variables d'entrée.

L'intégration du modèle « mauvaises herbes » dans STICS (pour des simulations longue durée de campagnes sur le long terme) permettrait au modèle démographique de bénéficier des variables déjà simulées par STICS. Cela permettrait également d'enrichir la gamme de variables proposées en sortie dans STICS, et peut-être à terme de prendre en compte dans STICS les effets des mauvaises herbes sur le fonctionnement des cultures, sur les pertes de nitrates.

### **3. Utilisation de STICS comme base du module concurrence du modèle démographique « mauvaises herbes »**

Actuellement, le module « concurrence » du modèle démographique est assez simple : il s'agit de relations entre la production semencière par plante d'une espèce donnée et la « charge concurrentielle » de la parcelle pendant la période de dissémination. La « charge concurrentielle » dépend de la surface foliaire de la culture, de la densité de plantes de chacune des espèces de mauvaises herbes à différents stades de développement, et de paramètres de « charge de concurrence » affectés à chaque individu en fonction de son espèce et de son stade. Ce module ne permet pas, dans sa version actuelle, de prévoir les pertes de rendements de la culture dues aux mauvaises herbes, ni de rendre compte des effets des conditions de croissance (variabilité de la « charge de concurrence » en fonction de la disponibilité en azote par exemple, alors que la aptitude à la concurrence de certaines espèces comme le colza dépend beaucoup des conditions de nutrition azotée). Par ailleurs, le module ne tient compte que de l'état de la parcelle au moment de la dissémination des graines, et pas des effets des relations de concurrence précoces.

**Il serait donc intéressant d'améliorer le module concurrence en y intégrant une dimension dynamique.** Deux approches sont possibles :

- Soit en utilisant la version « cultures associées » de STICS comme base pour simuler les relations de concurrence entre la culture et les mauvaises herbes. On simulerait donc la mise en place conjointe de la surface foliaire des différentes espèces en concurrence, de la hauteur de cette surface foliaire, de la répartition d'énergie entre les espèces. Cette approche nécessiterait de modifier STICS pour augmenter le nombre d'espèces en concurrence dans le peuplement plurispécifique, de paramétrer STICS pour des espèces de mauvaises herbes et d'évaluer les performances de STICS pour simuler des variables importantes pour les relations de concurrence (dynamique de la hauteur de la surface foliaire, par exemple). Cette approche serait intéressante du point de vue de l'étude des relations de concurrence, mais risque de conduire à des prédictions peu robustes du rendement et des productions de semences pour 2 raisons : (1) du fait du caractère exponentiel des relations de domination d'une espèce sur une autre telles qu'elles sont simulées dans la version « cultures associées » de STICS, une très petite erreur de prédiction dans les stades précoces risque de se traduire par une erreur très grande en fin de cycle ; (2) dans la réalité, ces phénomènes de domination d'une espèce sur l'autre sont limités par la plasticité morphologique liée à la concurrence. L'espèce dominée s'étiole pour placer sa surface foliaire le plus haut possible et ralentir ainsi son étouffement. Pour simuler correctement les relations de concurrence et gagner en robustesse (mais pas en facilité de paramétrage !), il faudrait simuler cette plasticité morphologique (difficile, mais intéressant ; certaines équipes étrangères travaillent sur cet aspect en relation avec le modèle INTERCOM).
- Soit en utilisant STICS dans sa version normale (culture pure) pour générer la dynamique de mise en place de la surface foliaire de la culture (qui dépendrait donc des conditions de croissance, de la nutrition azotée) qui serait utilisée pour générer des indicateurs synthétiques de contribution de la culture à la charge de concurrence globale de la parcelle. De cet indicateur synthétique dépendrait (i) la sensibilité de la culture à la concurrence des autres espèces (et donc les pertes de rendement) et (ii) la production semencière des espèces adventices (relations non dynamiques). Cette approche pourrait être raffinée en prenant en

compte les effets de la présence de mauvaises herbes sur le fonctionnement de la culture (nutrition azotée, biomasse) (figure 2).

Cette approche moins mécaniste pourrait avoir l'avantage de gagner en robustesse, et donc d'être plus adaptée pour constituer le module « concurrence et production semencière » du modèle démographique plurispécifique simulant les effets cumulatifs à long terme des systèmes de culture sur l'évolution des infestations de mauvaises herbes. Des discussions sont actuellement en cours pour monter un programme de thèse en collaboration avec l'Agromonie-Grignon sur le développement d'un module « concurrence » sur la base de cette approche, soit avec STICS, soit avec un autre modèle de culture (AZODYN, CERES, ...).

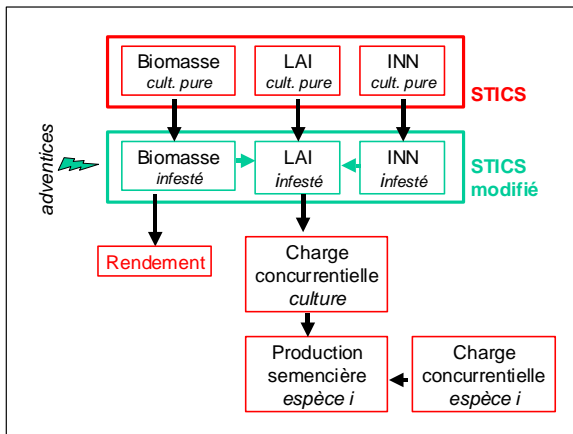


Figure 2 : proposition de schéma conceptuel d'un module concurrence et production semencière dérivé de STICS, pour un modèle démographique plurispécifique simulant les effets cumulatifs à long terme des systèmes de culture sur l'évolution des infestations de mauvaises herbes

## Fonctionnement physiologique de la canne à sucre et concepts du modèle STICS.

Françoise Ruget, Pascale Smith, Jean-François Martiné

Les décideurs sucriers ont besoin d'une estimation quantitative et qualitative du rendement des parcelles de cannes dont ils tirent leur matière première. Par ailleurs, le sevrage (stress hydrique appliqué en fin de cycle) est de plus en plus pratiqué à l'île de la Réunion pour optimiser la teneur en sucre des tiges. Dans ce cadre, les modèles de culture, capables de simuler l'effet des conditions pédoclimatiques et techniques sur le développement et la croissance d'une culture, peuvent être des outils potentiels de prévision du rendement et d'aide à la conduite de l'irrigation. STICS devrait pouvoir être adapté à la canne à sucre pour répondre à cette question et d'abord estimer la biomasse aérienne produite et ses composantes.

L'objectif de ce travail est donc d'établir des correspondances claires entre les processus physiologiques impliqués dans le fonctionnement des parties aériennes d'un peuplement de canne et les formalismes de STICS.

Les modules qu'il faut calibrer en priorité sont ceux de développement, croissance aérienne et élaboration du rendement et de la qualité. Des choix de correspondances sont nécessaires entre les termes employés dans STICS pour les plantes dites à floraison indéterminée, c'est-à-dire à mise en place de fruits étalée dans le temps, et la mise en réserve de sucres dans les tiges de canne à sucre. Ces correspondances permettent d'attribuer des significations et des valeurs aux paramètres.

Six concepts ont donné lieu à redéfinition ou adaptation : le démarrage du cycle, les notions de densité, de stades de développement, de fruit et de maturité et la compétition entre les organes récoltés et le feuillage.

Les principales questions tournent autour de l'équivalence fruits-réserve de sucres. Sachant que les cannes dites usinables sont les tiges (ou parties de tiges) lorsqu'elles sont devenues assez dures pour être traitées en usine, on établit une correspondance entre une tige usinable de canne et un fruit de STICS. Le passage à l'état de canne usinable est un peu antérieur (100 °j) à l'accumulation de sucres, mais on les fait se correspondre pour plus de simplicité. Par conséquent, les fruits noués de STICS sont les cannes usinables et aptes au remplissage.

Pour la canne, la durée de phase de mise en place des « fruits »,  $STDRPNOU$ , représente donc la durée de transformation de tiges tendres en cannes usinables.  $NFRUITNOU$  ( $j^{-1}.m^{-2}$ ), la vitesse de passage de l'état de canne non usinable à celui de canne usinable, est calculé à partir d'un potentiel  $^{\circ}j/inflorescence$ , de la durée de développement thermique et d'effets réducteurs (rapport source-puits et stress azoté, de façon optionnelle).

La durée thermique s'écoulant entre le début de remplissage du premier fruit et celui du dernier (=  $STDRPNOU$ ) a été observée, elle est approximativement égale à 650 °j (comm. pers. Martiné, 2001) pour un cycle de repousse.

Le remplissage des cannes a donc lieu à partir de  $DRP$ , pendant une durée individuelle  $DUREEFRUIT$ , avant une date ultime liée à la maturité, mais qu'on a fixée arbitrairement à la date de récolte classique pour cette culture à la Réunion (MAT à 5000 °j, donc  $DUREEFRUIT = 2850^{\circ}j$ ).

La déshydratation des cannes usinables commence dès leur mise en place comme cela semble être le cas d'après les observations de nos données ( $STDRPDES = 0^{\circ}j$ ).

La biomasse aérienne est répartie entre les organes végétatifs et reproducteurs, selon un taux de partition (relation source-puits,  $MS_j$  de tiges/ $MS_j$  de feuilles =  $SOURCEPUITS$ ), nul au départ (la plante ne comporte quasiment que des feuilles) et qui augmente linéairement jusqu'à 0,75 où il se stabilise (Martiné, 1996).

Pour ce critère (SOURCEPUITS), non directement accessible, il n'est pas possible de faire mieux que de chercher à attribuer des valeurs logiques.

Le nombre de fruits (=tiges) à la récolte NBFruit, qui est proche de 10/m<sup>2</sup>, est obtenu à partir du nombre de fruits potentiels AFRUITPOT limité par le rapport source-puits. Si le rapport source-puits était égal à 1, AFRUITPOT devrait être égal à 10/STDRPNOU soit 0,015. Comme SOURCEPUITS est inférieur à 1 au moins pendant certaines parties de la période DRP-NOU car STICS ne donne pas de priorité totale aux fruits en cours de « nouaison », on attribue une valeur plus élevée à AFRUITPOT 0,02 °j<sup>-1</sup>.

Pour le module de qualité (richesse en sucres), on suppose qu'il y a une augmentation linéaire des sucres dans la matière sèche des fruits entre le début de remplissage et la maturité physiologique. Cette augmentation est dimensionnée par le paramètre VITPROPSUCRE (g/g MS/°j). La combinaison de cette évolution et de celle de la teneur en eau calculée de façon dynamique pour les organes récoltés aboutit à des teneurs dans la matière fraîche (variable de sortie SUCRE (g/g MF)).

NBBOITE est le paramètre qui permet de discrétiser la courbe de croissance d'un fruit pour appliquer à chaque fruit une certaine vitesse de croissance dépendant des paramètres AFPF et BFPP de la courbe logistique dépendant de sa classe d'âge (% de croissance par rapport à sa croissance « maximale »). Plus le nombre de "boîtes" est élevé, plus la modélisation de la croissance des fruits sera précise, nous avons choisi d'utiliser 12 boîtes c'est-à-dire 12 âges définissant des vitesses de croissance potentielle de chaque fruit (= la tige). Comme la courbe de croissance est relativement linéaire, on prend les paramètres d'une logistique très proche d'une droite (AFPF = 0.5 et BFPP = 1). Enfin, PGRAINMAXI, qui représente le poids maximum d'une tige, avait été fixé d'après des observations antérieures à 1200g MS/fruit. C'est probablement une valeur adaptée à l'intervalle entre coupes (dans certaines zones, les intervalles peuvent être 18 mois et même dépasser 2 ans).

La disponibilité de données, provenant d'essais menés dans diverses conditions pédo-climatiques de la Réunion a permis de bien mener à bien l'ajustement des valeurs des paramètres concernés par la calibration. L'introduction du concept de plante à croissance indéterminée, (fructification étalée), s'accompagne de la simultanéité possible de croissance des feuilles et des mises en réserve. De plus, le découplage de la croissance et de la sénescence de l'indice foliaire permet de simuler les variations d'indice foliaire spécifiques aux plantes pérennes (cas de sécheresse). Enfin, l'adjonction d'un module de qualité non encore complètement testé sera très utile pour la suite du travail (évaluation de l'effet du sevrage sur l'enrichissement en sucres des tiges).

#### Références bibliographiques

MARTINE J-F., 1996. *MOSICAS, Modèle de fonctionnement et d'élaboration du rendement canne. Paramétrage de la variété R570*, CIRAD, La Réunion, 40p..

Références bibliographiques complémentaires

MARTINE J-F., SIBAND P. and BONHOMME R., 1999. Simulation of the maximum yield of sugar cane at different altitudes : effect of temperature on the conversion of radiation into biomass.

*Agronomie*, 19, pp. 3-12.

SMITH Pascale, 2001. Établissement de correspondances entre le fonctionnement physiologique de la canne à sucre et les concepts du modèle. Calibration des modules de développement, de croissance aérienne, d'élaboration du rendement et de la qualité pour la variété R570. Mémoire de fin d'études, Diplôme d'Agronomie Approfondie, Sciences et Techniques des Productions végétales, Option : Ingénierie des Agrosystèmes, 63 p. + annexes.



## Utilisation de STICS pour les cultures de bananes associées ; acquis et besoin

Régis **TOURNEBIZE**, Luis Mauro **SANTOS SILVA\***, Cathy **CLERMONT-DAUPHIN**, Harry **OZIER-LAFONTAINE**, Simon **LEINSTER**

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE - UR Agropédologique  
Domaine Duclos - Prise d'Eau  
**97170 PETIT BOURG**

\*UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA - Centro Agropecuario  
Caixa Postal N°222 CEP 68.501-970  
MARABÁ - PARA - BRASIL

### Introduction

La banane d'exportation est conduite de façon quasi exclusive en monoculture intensive aux Antilles, comme dans beaucoup de pays producteurs. Elle nécessite pour maintenir le niveau de production une grande quantité d'intrants chimiques : fertilisants, insecticides et nématicides. Ce type de système semble être compromis du fait de la suppression de certaines matières actives à partir de cette année, et d'une sensibilité accrue de la société (consommateurs, décideurs publics) aux problèmes d'environnement, de qualité des produits, et de durabilité.

Grâce à nos acquis relatifs au fonctionnement des cultures associées, nous travaillons actuellement à l'élaboration de systèmes de culture associant bananiers et plante de services. Ces plantes doivent permettre de pallier les inconvénients actuels des systèmes de culture i) en diminuant les risques d'érosion, ii) en augmentant la fourniture minérale du sol (remontées d'éléments profonds, fixation d'azote) iii) en limitant les dégâts causés par les nématodes, sur la culture de banane.

La mise au point de tels systèmes de culture nécessite la connaissance du fonctionnement de l'association sous différents scénarios environnementaux et techniques (décalage de cycle des 2 espèces, type d'espèce associée, densité). STICS, déjà utilisé sur la banane (Brisson et al., 1998) et dans le cadre des associations de cultures (Brisson, 1998, Brisson et al., en préparation) permet une adaptation rapide.

Les travaux ci-après illustrent une évaluation de STICS pour la culture pure de bananiers comme pour celle associée. Des pistes sont exposées pour mieux coller aux réalités de cette production.

### Matériel et méthode

L'expérimentation a consisté à mettre en place à Duclos (16,3° de latitude, 61° de longitude Ouest) 2 traitements de bananiers plantés en quinconce à une densité de 1890 plant. ha<sup>-1</sup>, l'un pure, l'autre associé à *Canavalia ensiformis* (une légumineuse tropicale) implanté, entre les lignes de bananiers, en double rangs à une densité de 25 000 plant.ha<sup>-1</sup>.

Tous les 10 jours environ des mesures de développement (hauteur, diamètre, nombre de feuilles, longueur et largeur) étaient effectuées sur 10 bananiers de chaque traitement. Tous les 3 mois des mesures de biomasse et de LAI ont été réalisées sur 3 plants de chaque traitement.

## Résultats Discussion

Nous présentons uniquement les données relatives aux réponses des parties aériennes du bananier, les aspects souterrains (enracinement, bilan hydrique) sont en cours de traitement.

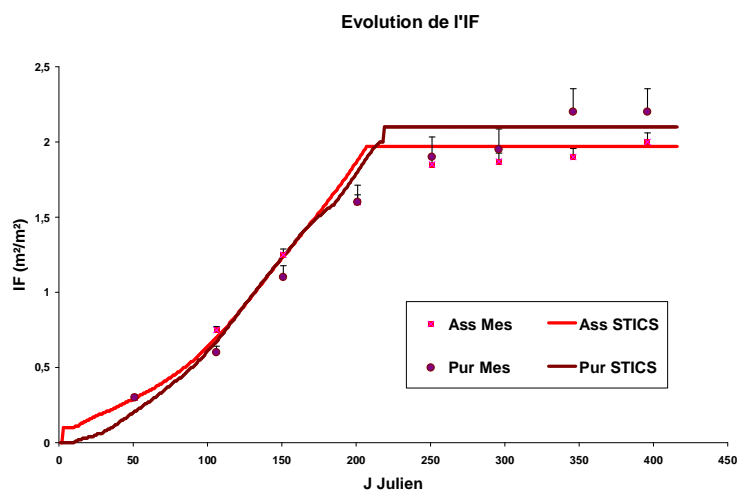


Figure 1 : Evolution des indices foliaires mesurés (●) et simulés (—) pour les bananiers purs (●) ou associés (●).

La figure 1 présente l'évolution simulée et mesurée de l'indice foliaire pour les traitements pur et associé. Pour le bananier associé, on note une légère surestimation de STICS dans la phase de développement rapide du LAI, liée à une mauvaise prise en compte de l'effet de compétition, auquel on pourra remédier par une meilleure paramétrisation.

Tableau I : Comparaison mesure/modèles de données liées au rendement.

	Bananiers Purs		Bananiers Associés	
	Mesure	STICS	Mesure	STICS
Rdt fruits (tonne)	27,5 (5,4)	27	34,8 (7,3)	36,4
Date récolte	10/11 (27 j)	5/11	26/11 (27 j)	4/11
Nbre de fruit/plt.	102 (12)	130	120 (19)	135

( ) écart type.

Dans l'ensemble STICS donne satisfaction pour l'estimation des rendements de bananes en pure comme en associé. Les résultats de la simulation sont toujours dans la gamme d'hétérogénéité liée à l'écart-type. On pourra tout de même améliorer le paramètre nombre de fruits et mieux prendre en compte les différences en terme de développement entre un bananier pur et un associé (différence de croissance en hauteur, différence de température, effet des stress sur le cycle).

## Conclusion - Perspectives

On note 3 voies d'amélioration du modèle :

→ pour l'espèce banane il serait intéressant de tenir compte :

- de l'hétérogénéité de floraison et de récolte, qui, en situation de non-fertilisation, s'étend sur plus de trois mois,  
- du mode de reproduction du bananier par rejets qui se développent assez tôt dans le cycle du pied mère.

→ pour une meilleure prise en compte de la plante de service en terme de compétition il serait intéressant d'envisager :

- des espèces associées d'abord plus hautes puis plus petites que le bananier, au sein d'une seule simulation ;
- l'association avec une troisième espèce

→ enfin , pour l'étude des effets liés à la biologie de la plante de service il faudrait :

- envisager la prise en compte d'un compartiment effet des ravageurs, plus ou moins régulé par la plante de service.

Quoi qu'il en soit STICS produit dans sa version actuelle, des informations pertinentes quand au fonctionnement de l'association banane/plante de service.

Avec une meilleure connaissance des valeurs des différents paramètres et avec les améliorations escomptées, STICS sera un outils incontournable pour l'étude de scénarios visant à l'élaboration concrète d'itinéraires technique et de système de culture bananiers/plante de service.

### **Bibliographie**

Brisson N., 1998. STICS APC. Document interne, 41pp. + annexes

Brisson N., Dorel M. et Ozier-Lafontaine H., 1998.- Effects of soil management and water regime on the banana growth between planting and flowering. Simulation using the STICS model. Acta Hort., 490, 229-238.

Brisson et al., en préparation. Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parametrisation.

## Modélisation des relations entre ressources azotées et croissance et développement d'une espèce Indéterminée : EXEMPLE DE LA TOMATE D'INDUSTRIE AU CHILI.

Héctor Valdés Gómez<sup>1</sup>, Christian Gary<sup>2</sup>, Nadine Brisson<sup>3</sup>, Samuel Ortega-Farías<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CITRA, Faculté des sciences agronomiques, Université de Talca, Casilla 747, Talca, Chili

<sup>2</sup> INRA, UMR SYSTEM, CIRAD TA 40/01, avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5

<sup>3</sup> INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, domaine Saint Paul, site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9

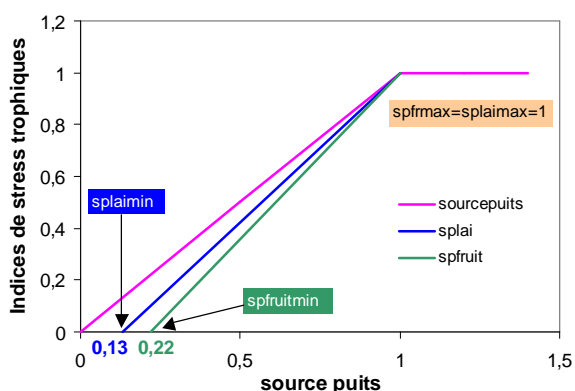
### Résumé

Dans une culture de tomate, des ressources azotées insuffisantes se traduisent par une diminution de l'indice foliaire (LAI), de la production totale de biomasse et du rendement en fruits (Scholberg *et al.*, 2000). Dans le modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998), trois indices de stress azoté (innlai, inns, innsenes) interviennent sur différentes fonctions physiologiques simulées.

Fonction physiologique	Indice de stress associé
Développement (option retard stress)	innlai
Croissance LAI	innlai
Sénescence LAI (option LAI brut)	innsenes
Sénescence LAI (option LAI net)	innlai
RUE	inns
Pilotage automatique fertilisation (option)	inns
Nombre de fruits ou grains (option)	inns

Pour les espèces de type indéterminé comme la tomate, la compétition trophique entre organes végétatifs et reproducteurs est un élément important de l'élaboration du rendement. Pour en tenir compte, des formalismes spécifiques à ce type de développement ont été introduits à partir du calcul du rapport entre les activités des sources et des puits de carbone (*sourcepuits*). A partir de ce rapport, différents indices de stress trophique sont calculés ; ils modulent la mise en place des organes végétatifs et reproducteurs :

- *splai* contrôle la dynamique de croissance de l'indice foliaire ;
- *spfruit* permet de calculer le nombre de fruits noués.



L'objectif principal de ce travail a été d'évaluer la robustesse de ces formalismes dans un contexte de variation des ressources azotées : les formalismes de stress carboné étaient-ils suffisants ou bien



devait-on en introduire de nouveaux pour gérer le développement reproducteur d'une espèce indéterminée ? Un objectif secondaire était de paramétrer le modèle pour deux variétés de tomate industrielle.

Les expérimentations ont été réalisées à la Station Expérimentale Panguilemo (EEP) de l'Université de Talca (35°23'S; 71°40'W) pendant les saisons 2000/01 et 2001/02. Pendant la première saison, l'essai a été mis en place le 9 novembre 2000 avec des plants de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) de la variété Heinz 8893. Dans cette expérimentation, on a appliqué quatre traitements de fertilisation azotée : 0, 100, 120 et 140 kg N ha<sup>-1</sup>. Au cours de la deuxième saison, les plants de tomate de la variété Hypeel ont été transplantés le 27 octobre 2001 et les doses d'azote appliquées ont été 0, 50, 90 et 130 kg N ha<sup>-1</sup>. Dans chacune de deux études, la densité de plantation était de 33333 plantes ha<sup>-1</sup> et la méthode d'arrosage utilisée était le goutte à goutte. La fréquence et la durée d'irrigation ont été établies selon les règles données par le Centre de Recherche et de Transfert en Irrigation et Agroclimatologie (CITRA) de l'Université de Talca.

Des mesures périodiques de matière sèche totale et des fruits, de surface foliaire et de teneur en azote des plantes ainsi que des suivis hebdomadaires de phénologie ont été effectuées. Les qualités prédictives du modèle ont été évaluées à l'aide de l'écart quadratique moyen (RMSE) et de l'efficacité du modèle (EF) (Brisson *et al.*, 2002).

Le travail sur les données de la première saison a conduit (1) à estimer les paramètres des relations entre *sourcepuits* et les indices de stress trophique *splai* et *spfruit*, et (2) à introduire un effet direct du stress azoté (*inns*) sur la vitesse de production d'organes reproducteurs *nfruitnou*, de sorte que :

$$nfruitnou = afruitsp \times sourcepuits \times inns$$

*fruitsp* étant la vitesse de nouaison potentielle. Ainsi, l'effet dépressif du stress azoté sur l'indice foliaire et par conséquent sur l'équilibre *sourcepuits* ne suffit pas à rendre compte de la réduction associée de la charge en fruits. Développement végétatif et reproducteur sont tous deux susceptibles d'être limités par des stress carbonés et azotés.

Les données de la deuxième saison ont servi à évaluer la nouvelle version du modèle. L'analyse statistique indique une meilleure estimation de la matière sèche totale (RMSE <0,6 ton\*ha<sup>-1</sup>, EF > 87 %) que de la matière sèche des fruits (RMSE <0,7 ton\*ha<sup>-1</sup>, EF > 46 %) dans tous les traitements. Pour l'estimation du contenu en N dans la plante et pour l'indice foliaire, on observe des valeurs d'efficacité du modèle de près de 1 et de faibles valeurs de RMSE. Dans l'ensemble des traitements, celui qui n'a pas reçu de fertilisation azotée est celui pour lequel les estimations sont les moins bonnes, sauf pour l'estimation de la matière sèche des fruits et le nombre des fruits. Cela justifie donc un travail supplémentaire sur les processus de croissance et de développement hors stress azoté. Les deux variétés utilisées se différencient par les sommes de température entre les principaux stades de développement et non par le paramétrage des fonctions de stress, qui semblent donc présenter un caractère générique.

En conclusion, les modifications introduites dans STICS améliorent le fonctionnement de son mode indéterminé dans des conditions de stress azoté. Elles seront utiles en particulier pour l'évaluation de stratégies de réduction des intrants, dans le cadre desquelles la fréquence des stress peut augmenter. Pour la tomate d'industrie, il sera nécessaire d'étendre le paramétrage au grand nombre de variétés qui sont utilisées.

#### BIBLIOGRAPHIE

Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet,

P. Cellier, J. Machet, J. Meynard, R. Delécolle. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and maize. *Agronomie* 18: 311-346.

Brisson, N., F. Ruget, P. Gate, J. Lorgeou, B. Nicoullaud, X. Tayot, D. Plenet, M. Jeuffroy, A. Bouthier, D. Ripoche, B. Mary, E. Justes. 2002. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22: 69-92.

Brisson, N. et B. Mary. 2002. STICS Version 5.0. Notice concepts et formalismes .

Scholberg, J., B. McNeal, J. Jones, K. Boote, C. Stanley, T. Obreza. 2000. Growth and canopy characteristics of field-grown tomato. *Agron. J.* 92: 152-159.

Session 3

Stics environnement

Animateur : Jacques Granier

## Apport de STICS à l'évaluation de scénarios de conduite de culture en conditions d'eau limitée<sup>2</sup>

Philippe Debaeke

INRA, Unité d'Agronomie, BP 27, 31326 Castanet-Tolosan cedex, debaeke@toulouse.inra.fr

Plusieurs stratégies d'adaptation au stress hydrique ont été décrites, principalement pour évaluer l'adaptation variétale: (a) l'esquive, qui consiste à achever le cycle cultural avant l'apparition de sécheresses drastiques (terminal drought) ou, sous nos climats, de décaler les phases les plus sensibles par rapport aux périodes de forte demande climatique ou de faibles précipitations, et (b) la tolérance, lorsque la culture maintient la croissance à de plus faibles teneurs en eau. Par la conduite de culture, il est possible également de modérer l'intensité de la contrainte (par l'irrigation) ou de réduire les besoins en eau. On parle ainsi de rationnement végétatif pour désigner une stratégie de réduction précoce du prélèvement d'eau en vue d'un report aux phases de plus forts besoins (floraison, remplissage). Dans les zones où le rendement est régulièrement limité par l'eau, l'agriculteur doit appliquer une combinaison satisfaisante de ces stratégies afin de réduire les impacts du stress hydrique, en évitant de trop pénaliser le rendement les années les plus favorables.

L'évaluation de ces stratégies a recours aux modèles de simulation dynamique car l'expérimentation classique ne peut prendre en charge l'extrême variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations et la gamme très large des scénarios culturaux à tester. A partir des années 80, plusieurs modèles à base éco-physiologique, spécifiques ou génériques, ont été développés pour représenter la dynamique de l'eau dans le sol (à l'échelle de la culture ou du système de culture) et la réponse des principales cultures à cette disponibilité (citons APSIM, CERES, CropSyst, EPIC, STICS parmi les plus diffusés). De l'expérimentation numérique est ainsi conduite à l'aide de ces outils. Pour cet objectif, il faut disposer ou générer une base de données climatique journalière suffisante (> 30 ans, climat passé ou scénarios de changement climatique), proposer des scénarios techniques (sous forme ou non de règles de décision), formuler des hypothèses sur les conditions initiales, enfin, se munir d'une grille d'analyse du rendement et de l'utilisation de l'eau.

Parmi les modèles existants, STICS prend en charge les interactions eau-azote et les conséquences du manque d'eau sur la plupart des processus biophysiques. La contrainte hydrique joue ainsi sur la mise en place du LAI, l'accumulation de biomasse, les transferts d'assimilats, la qualité des grains. Par le bilan d'énergie, la température de culture est modélisée ce qui permet de rendre compte de l'effet du stress hydrique sur la phénologie. Tout changement de LAI agit en retour sur l'évaporation et la transpiration, ce qui permet de tester l'effet d'un rationnement végétatif. Enfin, l'effet d'une sécheresse sur la disponibilité et le transfert d'azote est pris en compte. Certains de ces processus restent encore à évaluer. Néanmoins, une évaluation qualitative du modèle est possible sur certains points. Dans cette étude, nous nous appuyons sur le caractère intégratif du modèle pour simuler l'élaboration du rendement (ici le blé tendre) en conditions d'eau limitée et évaluer des stratégies concernant la durée du cycle (esquive), le peuplement (rationnement) et la disponibilité en eau (irrigation).

Lorsque l'eau est le principal facteur limitant, Passioura (1977)<sup>2</sup> préconise de décomposer le rendement du blé en 3 termes largement indépendants :

$$\text{Rendement (R)} = \text{Transpiration (T)} \times \text{Efficacité de Transpiration (TE)} \times \text{Indice de récolte (IR)}$$

On peut décomposer également le terme T de la façon suivante (Es = évaporation du sol) :

$$T = (T+Es) / (1+Es/T)$$

L'amélioration du rendement s'obtient ainsi en augmentant la quantité totale d'eau disponible pour la culture (T+Es), l'efficacité de transpiration (TE) et l'indice de récolte (IR) mais en diminuant la contribution de Es (Es/T). Tous ces termes sont simulables par STICS 4.0, utilisé dans cette étude.

<sup>2</sup> Ce texte est adapté d'un exposé réalisé au 7<sup>ème</sup> Congrès de l'ESA (Cordoue, Juillet 2002). Voir également *Crop management adaptation to water-limited environments*, Proceedings 7<sup>th</sup> ESA Congress, pp.33-44.

<sup>2</sup> Passioura J.B., 1977. *J.Aust.Inst.Agric.Sci.* 43 :117-120

A titre d'exercice de simulation, nous avons retenu 3 environnements climatiques contrastés pour évaluer les stratégies d'adaptation de la conduite du blé d'hiver aux faibles disponibilités en eau :

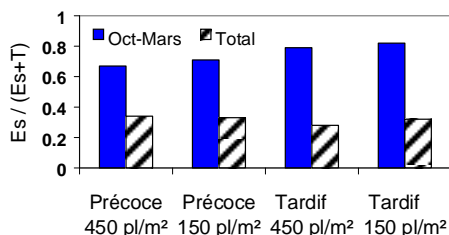
- Meknès (Maroc) : 550 mm de pluie (75 % Oct à Mars), indice d'aridité  $P/ET_{ref} = 0.36$  ;
- Avignon (Vaucluse) et Toulouse (Hte Garonne), 700 mm dont 50 % Oct à Mars, mais avec une aridité plus forte à Avignon ( $P/ET_{ref} = 0.69$  contre 0.81).

La gamme de précocité utilisée en France pour le blé tendre a été évaluée pour les 3 séries climatiques en utilisant STICS. On a fait l'hypothèse d'un sol moyennement profond (120 cm), de réserve 165 mm, avec un recouvrement total au semis (15/11).

Comment la conduite de culture peut-elle influencer les différents termes de l'équation du rendement en condition d'eau limitante ?

1. en augmentant la quantité d'eau initiale et son extraction par la culture (T+Es). Ceci passe par le choix de situations à forte disponibilité initiale (profondeur, culture précédente,  $\tau$ ), par l'augmentation de cette disponibilité (meilleure infiltration par le travail profond, extraction profonde après sous-solage, irrigation) et par la limitation des pertes par évaporation (désherbage, gestion des résidus, travail du sol minimum). Ces options n'ont pas été évaluées ici : STICS a la capacité de simuler des stocks initiaux variés ainsi que l'effet d'un mulch mais pas directement l'effet du travail du sol sur la structure et l'amélioration des possibilités de stockage.
2. en diminuant le rapport Es/T par le mulching mais aussi par la couverture rapide du sol par la culture (vigueur de la variété, densité de peuplement élevée, fumure starter). A l'aide de STICS, on montre que même si Es (semis-récolte) est supérieur à Meknès pour les variétés précoces et les faibles densités de peuplement, le rapport  $Es/(Es+T)$  est plus faible en hiver pour les génotypes à développement précoce (Fig.1).
3. TE est plus élevée lors des phases de faible VPD (hiver). Ceci peut être atteint par des variétés précoces tolérant les basses températures. La fertilisation azotée améliore TE en augmentant les surfaces vertes et

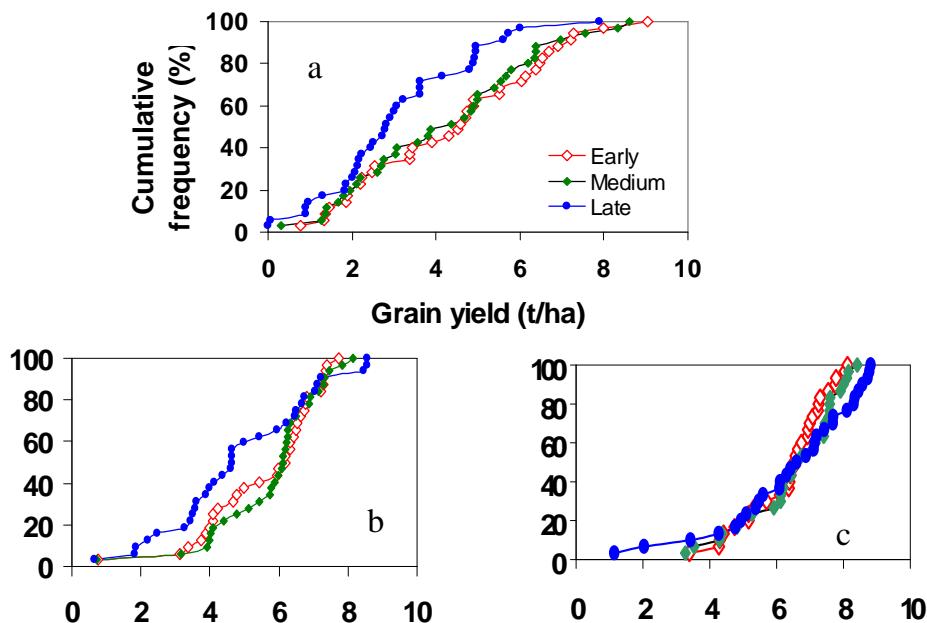
**Fig.1** Contribution de l'évaporation du sol (Es) à la consommation d'eau totale (Es+T) d'une culture de blé d'hiver selon la précocité variétale et la densité de peuplement à Meknès (Maroc), simulation STICS 4.0



l'efficacité biologique ( $\epsilon_b$ ).

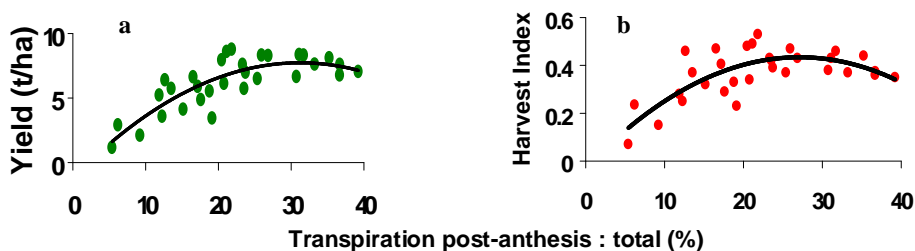
Les différents termes de l'équation (T+Es, Es/T, TE, IR) sont modifiés par la précocité de la variété. A Meknès et à Avignon, il apparaît clairement que les types tardifs sont nettement disqualifiés pour le rendement par rapport aux types précoces et intermédiaires (Fig.2). A Toulouse, la variabilité de réponse est plus forte : elle dépend de la disponibilité en eau et de la température pendant la phase de remplissage du grain. Lorsque le stress est prononcé ( $R < 60$  q/ha), les variétés précoces ont un meilleur comportement ; l'inverse est observé pour  $R > 60$  q/ha. Face à ces situations fluctuantes, le compromis consiste à choisir des variétés intermédiaires. On peut conclure que STICS a la capacité de reproduire de telles interactions observées en pratique. A l'aide des variables de l'équation de Passioura (1977), on peut mieux analyser l'élaboration du rendement du blé dans ces différentes situations. Les cultivars tardifs se traduisent par une plus forte valeur de T+Es et de biomasse aérienne. TE est plus forte pour les variétés précoces en France (mais pas au Maroc). Es/T diminue pour les variétés précoces au Maroc mais augmente en conditions sub-humides à humides. IR est toujours plus faible pour les cultivars tardifs.

**Fig.2** - Effet de la précocité variétale sur le rendement du blé d'hiver à Meknès (a), Avignon (b) et Toulouse (c) : fréquence cumulée sur 35 années de climat, simulation STICS 4.0



Diminuer la demande en eau en période végétative pour conserver la ressource tardivement est souvent évoqué parmi les stratégies d'adaptation. Ceci s'obtient par un rationnement végétatif (réduction de la densité de peuplement ou de l'azote, défoliation partielle, modulation de l'antennage). Le principe est d'optimiser la contribution de la transpiration post-floraison à la transpiration totale. Sur blé, la valeur de 25 % apparaît comme un optimum à Toulouse si l'on en croit STICS (Fig.3). Cet objectif doit se réaliser sans trop pénaliser la transpiration avant l'anthesis et le nombre de grains, car, dans ce cas, on assiste à une chute de IR et de rendement ( $T_{\text{remplissage}}/T > 30\%$ ).

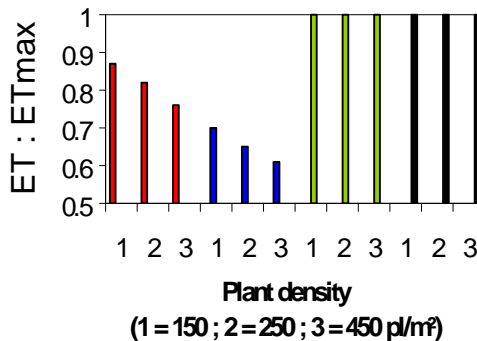
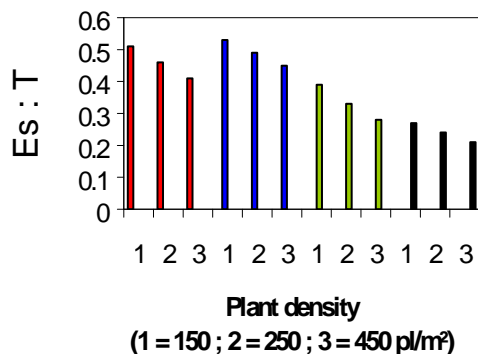
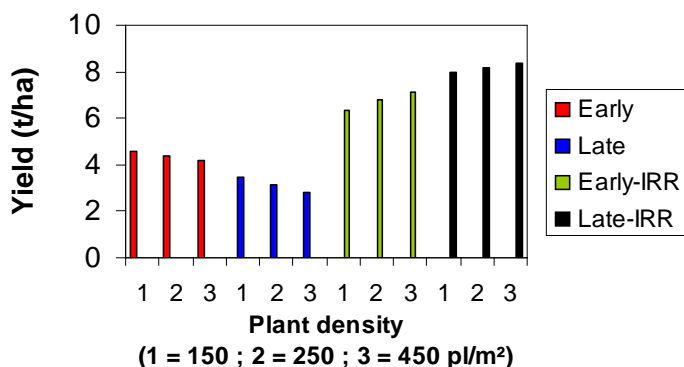
**Fig.3** Relation entre le rendement (a) ou l'indice de récolte (b) et la part de la transpiration du blé survenant après l'anthesis à Toulouse, variété tardive (1972-2001), simulation STICS 4.0



Des interactions ont pu être mises en évidence entre la disponibilité en eau, la densité de plantes et la durée de végétation grâce à l'utilisation de STICS (Fig.4). Dans le cas de Meknès, la combinaison « faible densité » - « cultivar précoce » est optimale en conduite sèche, alors que la combinaison opposée devient optimale si l'irrigation n'est pas limitante. A Toulouse, on n'observe pas cette interaction même en conduite sèche en raison de la plus forte disponibilité en eau. On fait bien sûr l'hypothèse d'une levée régulière et de l'absence

de problèmes pathologiques. La réduction de  $E_s/T$  est maximale pour les systèmes irrigués, en forte densité et pour les variétés tardives alors qu'en conduite sèche, les variétés précoces ont un plus faible ratio  $E_s : T$  que les tardives. Cet effet ne suffit pas en lui-même à rendre compte des variations de rendements : le rapport  $ET/ET_{max}$  qui exprime le taux de satisfaction du besoin en eau démontre l'effet positif du rationnement et des stratégies d'esquive pour l'économie de l'eau et la stabilité du rendement en conduite sèche. Réduire le LAI (par la densité) pour un cultivar précoce est une stratégie pour diminuer significativement le stress hydrique. En condition irriguée, la durée de la période de croissance et le rayonnement intercepté sont limitants pour des variétés précoces. Aussi, les variétés tardives et les hautes densités conduisent aux plus forts rendements.

**Fig.4** Effets de la précocité, de la densité de peuplement et de l'irrigation de complément sur le rendement,



le rapport évaporation ( $E_s$ ) : transpiration ( $T$ ) et le rapport consommation en eau du blé ( $ET$ ) : consommation potentielle ( $ET_{max}$ )

Plutôt que de rechercher le rendement le plus élevé en moyenne, il faudra aussi se préoccuper de la variabilité associée à ce résultat. Plusieurs stratégies peuvent être testées en vue de minimiser le risque climatique : quand semer après le retour des pluies à l'automne ? quelle densité de semis optimale si l'on inclut le risque d'échec à la levée ? quand apporter l'azote en fonction de la disponibilité en eau (pluie, irrigation) ? quel calendrier optimal pour une irrigation de complément ? la stratégie d'étalement de la floraison (variété ou espèce indéterminée) est-elle une stratégie d'esquive efficace ? Toutes ces questions mériteraient également une exploration par modèle. Il faudrait examiner plus en détail comment STICS pourrait aider à y répondre. Cependant, la simulation de stratégies fixes ne convient pas toujours dès lors qu'il faut proposer des conduites plus adaptatives (au semis ou en végétation en fonction de l'eau disponible). Le couplage avec les règles de décision serait ici très utile.

## Lessivage des nitrates sous sol nu : comparaison des estimations STICS avec les teneurs dans la solution du sol à 3 niveaux.

JE Delphin, JY Chapot et E. Savourat.

Collaboration technique : S. Chaumonnot, D. Hartmann et J.L. Meyer.

UMR VVA, INRA Colmar 28, rue de Herrlisheim 68021 Colmar

### Introduction

STICS est un modèle de culture conçu pour prévoir l'effet du climat et des techniques de culture sur la production (en quantité et en qualité) et l'environnement. En matière d'impact environnemental, la possibilité d'évaluer à l'aide du modèle le lessivage des nitrates en fait un outil d'appui technique utile.

Le transfert d'eau et de nitrate est simulé dans le modèle en considérant le profil de sol subdivisé en couches élémentaires. A l'occasion d'une pluie ou d'une irrigation, le surplus d'eau par rapport à la capacité au champ d'une couche remplit en cascade les suivantes. Par ailleurs, la teneur en nitrates d'une couche élémentaire résulte du mélange complet entre la totalité de l'eau en place et celle de remplissage. Cette représentation donne des résultats assez proches de ceux du modèle de convection-dispersion (Mary et al. 1999).

Le but de l'étude présentée ici est de tester la validité au champ de cette formalisation de la circulation de l'eau et des nitrates dans le sol.

### Matériel et méthodes

L'étude a été conduite en 2001 et en 2002 sur un sol de limon calcaire du domaine expérimental INRA de Colmar. Une parcelle, maintenue nue depuis 1999, a été équipée pour échantillonner l'eau du sol à 50, 100 et 150 cm de profondeur (figure 1).

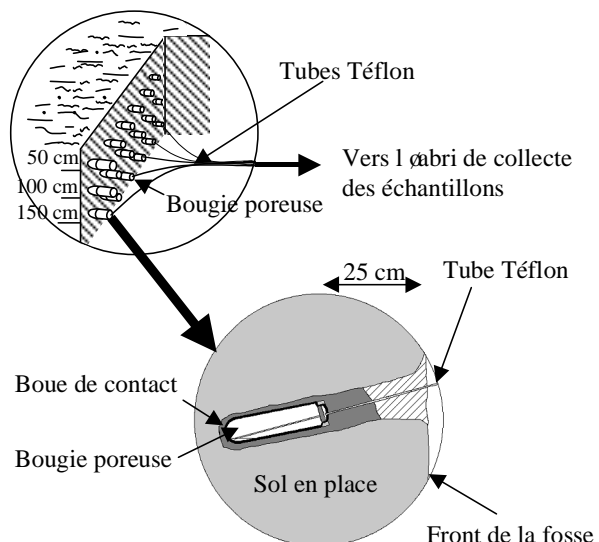


Figure 1 : Equipement de collecte de la solution du sol

L'équipement de collecte de l'eau du sol est constitué, pour chaque couche échantillonnée, de 6 bougies poreuses enterrées. Le prélèvement de l'eau est réalisé en appliquant une dépression de 650-750 mb, 12 à 24 h après l'apport d'eau, sur une durée qui varie de 24 à 72h selon la profondeur et



l'état hydrique du sol. Quatre bougies posées sur le sol permettent d'échantillonner les eaux de surface au moment des irrigations ou des pluies. Deux tubes d'accès pour une sonde à neutrons permettent de suivre l'humidité du profil avec un pas de 10 cm. La parcelle est équipée d'une rampe d'irrigation par aspersion ( $90 \text{ mm h}^{-1}$ ). Les données climatiques proviennent du site météorologique STEFCE attenant à la parcelle expérimentale.

En 2001 la parcelle a reçu deux irrigations de 30 mm ; un suivi sur toute l'année de l'humidité du sol sert à valider dans les conditions locales le bilan hydrique calculé par STICS (STICS 5, sol nu) sur un pas de temps journalier. En 2002, 190 mm ont été apportés en 8 irrigations entre le 18 avril et le 24 juillet. L'échantillonnage de la solution du sol a été effectué pendant l'année après chaque irrigation ou pluie significative (15-20 mm minimum). L'analyse des nitrates a porté sur un échantillon moyen des 6 prélèvements à 150 cm et sur tous les échantillons collectés à 50 et 100 cm de profondeur.

## Résultats

### Validation du bilan hydrique établi à l'aide de STICS

La validation porte sur la comparaison entre le stock d'eau dans le profil mesuré au cours de l'année 2001 et les prévisions du modèle.

Les réserves en eau du sol calculées par STICS, en utilisant les valeurs des paramètres attribuées par défaut, ne sont pas significativement différentes de celles mesurées sur le terrain (figure 2). Un essai de calage de 3 paramètres intervenant dans l'évaporation du sol (aclim, cfs et zesx) n'apporte qu'une amélioration minimale du critère d'optimisation.

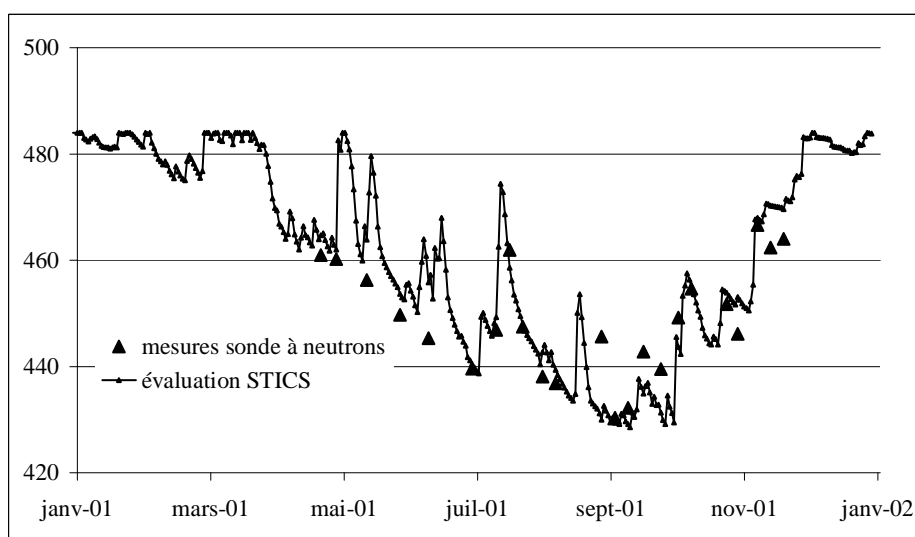


Figure 2 Réserves en eau du sol sur 150 cm en 2001 (mm)

Ainsi validé, STICS est utilisé en 2002 pour calculer le bilan hydrique sous sol nu et estimer les pertes d'eau par percolation au-delà de la limite inférieure du profil.

### Evolution des teneurs en nitrate mesurées dans l'eau du sol

Les teneurs en nitrates de l'eau collectée par les bougies poreuses après chaque pluie significative ou chaque irrigation sont présentées dans la figure 3. Au départ les valeurs sont élevées sur tout le profil (entre 220 et 350  $\text{mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$  selon la profondeur), conséquence de l'absence de cultures au cours des trois années qui précèdent.

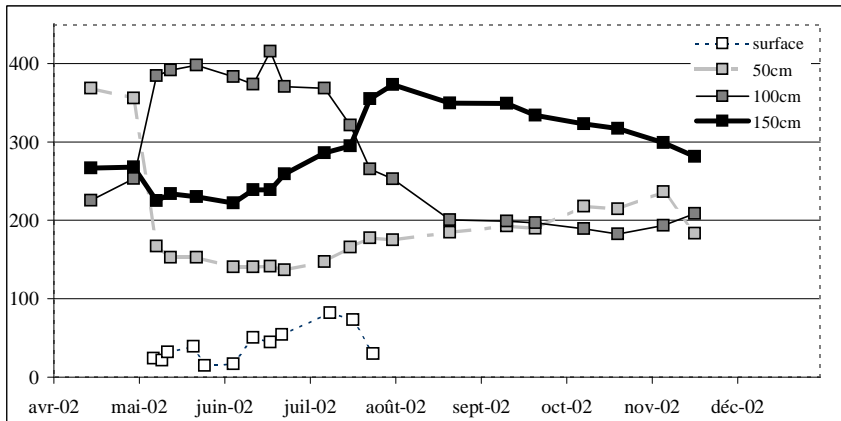


Figure 3 Evolution des nitrates de la solution du sol en 2002 ( $\text{mg L}^{-1}$ )

L'eau d'infiltration en surface est beaucoup moins chargée ( $20\text{-}50 \text{ mg L}^{-1}$ ). On peut discerner deux périodes charnières. Dans la première, survenant 20 jours environ après le démarrage de l'essai (mi-mai), l'évolution des teneurs en nitrates dans l'eau du sol peut être interprétée comme l'arrivée dans chaque couche de la solution qui se situait 50 cm plus haut lors des premières mesures. De même, la seconde période remarquable, située entre début et mi-août, correspondrait à une descente de 100 cm de la solution du sol. Ultérieurement les teneurs à 150 cm de profondeur baissent vers un palier vraisemblablement proche de celui observé à 50 et 100 cm, ce qui traduirait l'arrivée diffuse à cette profondeur des eaux situées en surface au moment du démarrage de l'essai. A 50 et 100 cm les teneurs en nitrates se stabilisent à un niveau ( $200 \text{ mg l}^{-1}$ ) qui traduit l'équilibre entre la charge des eaux apportées et la minéralisation estivale de la couche supérieure du sol.

#### Comparaison des mesures in situ avec les prévisions de STIC

Les teneurs en nitrates de la solution du sol mesurées à une profondeur donnée sont comparées à celles obtenues en affectant au volume d'eau à la capacité au champ de la couche correspondante de

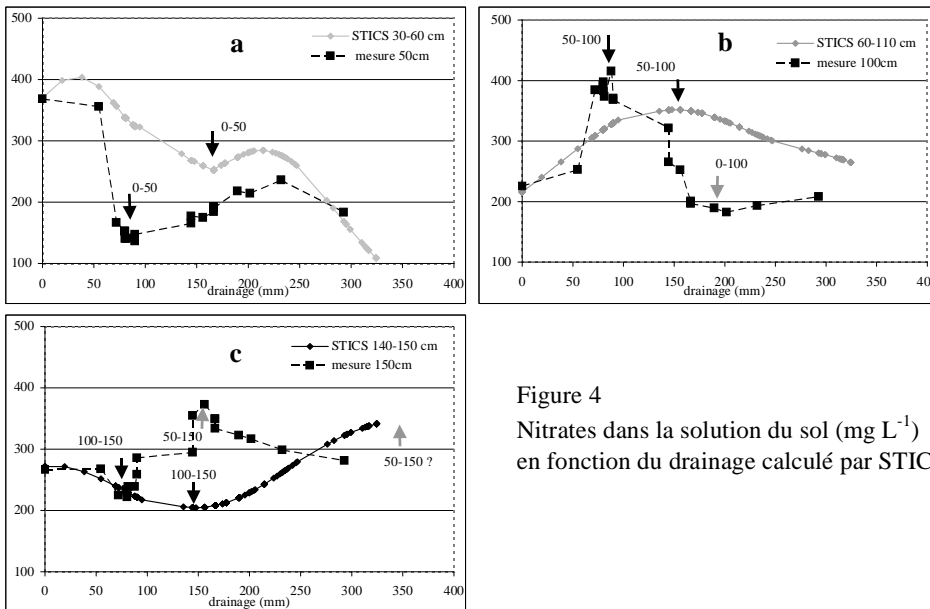


Figure 4  
Nitrates dans la solution du sol ( $\text{mg L}^{-1}$ )  
en fonction du drainage calculé par STICS

STICS la totalité de l'azote minéral présent chaque jour dans cette couche. L'évolution des teneurs est présentée en fonction du drainage estimé à l'aide de STICS au-delà de la limite inférieure du système (figure 4).

On peut constater un décalage entre les mesures faites sur le terrain et les simulations STICS.

Les variations des teneurs en nitrate attribuées à un déplacement de 50 cm de l'eau en profondeur (0-50 cm, 50-100 cm ou 100-150 cm) sont observées au champ après un drainage estimé par STICS à 80-90 mm. Les mêmes déplacements n'interviendraient d'après le modèle qu'après un drainage de 150-160 mm (figures 4a, 4b et 4c), ce qui est conforme à la formalisation des transferts de l'eau dans le sol adoptée dans STICS ; 160 mm correspond en effet à la capacité au champ d'une couche de 50 cm. De la même manière, la descente de 100 cm des nitrates observée au champ est associée à un drainage de 160-180 mm (figures 4a et 4b), alors qu'elle n'est pas encore effective dans la simulation après plus de 300 mm de drainage.

Ces distorsions entre les observations et les prévisions par STICS pourraient être réduites en introduisant dans les caractéristiques hydriques du sol définies dans le modèle une fraction immobile de l'eau qui ne participe pas aux mouvements de convection et dont les teneurs en nitrates, après les transferts, se mettent en équilibre avec la fraction mobile. Dans nos conditions expérimentales, ce type d'eau représenterait approximativement 50% du stock disponible à la capacité au champ.

### Conclusion

Ce type de partition de l'eau est fréquemment utilisé dans les modèles hydrodynamiques (Larsson and Jarvis, 1999). Son introduction dans STICS nécessite cependant une validation préalable du concept sur un jeu de résultats expérimentaux du type de ceux présentés ici ; elle ne se justifie par ailleurs que si l'on dispose de moyens d'estimer facilement la limite entre eau libre et immobile.

### Références bibliographiques

- Larsson, M.H., Jarvis, N.J., 1999. Evaluation of a dual-porosity model to predict field-scale solute transport in a macroporous soil. *J. Hydrol.* 215, 153-171.
- Mary, B., Beaudoin, N., Juste, E., Machet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. soil Sci.* 50(40), 549-566.

# Influence du changement climatique sur la répartition géographique et les calendriers de production de trois systèmes fourragers en zone de moyenne montagne

Stéphanie JUIN, Nadine BRISSON

Unité Climat Sol Environnement, Institut National de la Recherche Agronomique, Avignon, France

## Introduction

La concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a augmenté depuis plus d'un siècle, ce qui se traduit par une élévation des températures de la surface terrestre. Dans le siècle à venir, ce phénomène devrait s'amplifier et avoir des répercussions multiples notamment sur l'agriculture de demain. Dans le cadre de travaux effectués à l'INRA sur les impacts des changements climatiques, une étude a été entreprise pour analyser, grâce à la modélisation, les impacts de l'élévation de la température sur trois systèmes fourragers de moyenne montagne, dans la région Provence Alpes Cote d'Azur.

## Méthodologie

Les scénarios de réchauffement climatique fournis par le Laboratoire de Météorologie Dynamique et le générateur climatique LARS ont permis de créer des séries climatiques prenant en compte l'augmentation des températures. Ainsi quatre jeux de données ont été introduits en données d'entrée du modèle de culture STICS :

- deux séries existantes ; celle (série 1) des années 1961 à 1989 prise comme référence et celle (série 2) de 1990 à 2000 pour laquelle on suppose une amorce de changement climatique ;
- deux scénarios ; le scénario 3 qui prend en compte uniquement l'élévation de température prédite pour l'horizon 2070-2100 sous l'hypothèse d'un doublement de CO<sub>2</sub> et le scénario 4 incluant à la fois l'élévation des températures et leur variabilité mensuelle.

Afin de prendre en compte les variations climatiques à l'intérieur de la zone d'étude, les données climatiques standards de deux stations météorologiques ont été attribuées, en fonction de la composante géographique de leur climat, aux petites régions agricoles de la zone d'étude. Leurs températures maximales et minimales journalières ont également été modulées en fonction de l'altitude et de l'exposition grâce à l'introduction dans le modèle STICS d'un nouveau module. Une validation indirecte de celui-ci a été réalisée en comparant des dates de stades phénologiques simulées avec STICS et les dates équivalentes observées pour des cultures de luzerne et de graminées à différentes altitudes de la zone d'étude (cf. figure 1).

Trois systèmes fourragers ont été modélisés par le

modèle STICS ; des prairies de luzerne en culture pure, des prairies composées d'un mélange de graminées et des cultures de maïs ensilage et deux variétés de maïs ensilage (une variété semi précoce et une variété tardive semées avec un mois de décalage). Les dates de récoltes sont calculées à partir d'un nombre de degrés jour (correspondant à la maturité ensilage). Pour

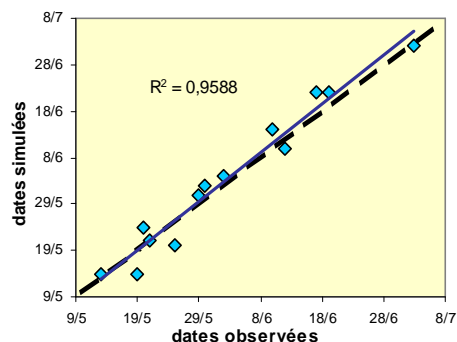


Figure 1: validation indirecte du module introduit dans STICS permettant de faire varier les températures en fonction de l'altitude et de l'exposition

les prairies de graminées et de luzerne, les fauches sont réalisées en fonction de sommes de température. Le gel pouvant être un facteur limitant, il a été défini, pour chaque culture, des seuils de température de dégâts sur les plantes.

Les résultats des simulations sont visualisés en cartographie spatiale dans la zone montagneuse étudiée, avec un Modèle Numérique de Terrain.

### Résultats

Pour les cultures de maïs ensilage, les dates de récoltes pour les scénarios 3 et 4 (cf. figure 2) sont plus précoces, quelque soit la variété et le lieu. Dans certaines régions agricoles, on observe une extension des zones de culture du maïs ensilage et dans les autres (d'altitude ou de latitude plus faibles), il apparaît un changement de précocité permettant le semis de variétés plus tardives. Pour les rendements, les résultats sont différents pour les scénarios 3 et 4. On obtient avec le scénario 3 une augmentation de rendement dans toute la zone d'étude, par contre pour le scénario 4, les dégâts de gel, important certaines années, font chuter les rendements en particulier pour les zones les plus au nord et les altitudes les plus élevées.

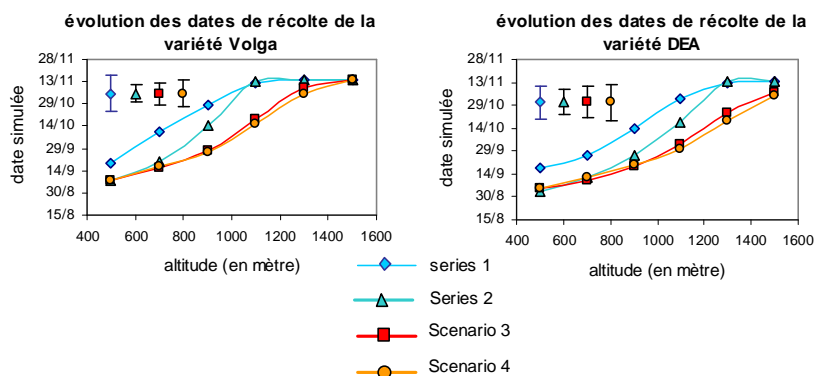


Figure 2 : évolution des dates de récolte (Résultats de simulation avec STICS) de deux variétés de maïs ensilage en fonction de l'altitude et pour quatre séries climatiques dans la région de Briançon

Concernant les prairies de luzerne et de graminées, on obtient un allongement de la période de coupe et de pâturage avec des dates de première coupe plus précoces et, parfois, une coupe supplémentaire.

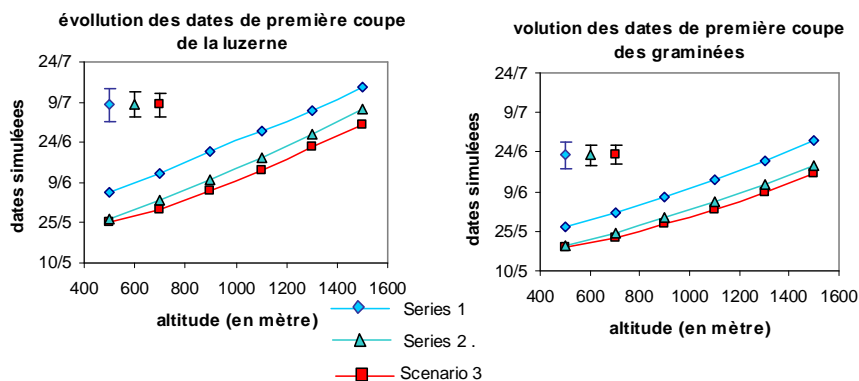


Figure 3 : Evolution des dates de première coupe (résultats de simulation avec STICS) de cultures fourragères de luzerne et de graminées en fonction de l'altitude et pour trois séries climatiques dans la région de Briançon.

Ces deux systèmes fourragers pourraient également être cultivés à des altitudes plus élevées que celles où on les trouve actuellement. Pour le rendement, les impacts du réchauffement climatique sont en général plus marqués pour la luzerne que pour les graminées.

### **Conclusion**

L'élévation de la température engendrée par l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique risque donc de modifier les cycles de ces trois types de cultures. Pour une altitude donnée, les résultats des simulations réalisées avec STICS montrent des cycles culturaux raccourcis et laisseraient donc prévoir un déplacement des cultures de 200 à 400 m en altitude. Toutefois, surtout pour le maïs ensilage, d'importants risques de gel pourraient limiter l'extension de cette culture.

## Évaluation de STICS vis à vis d'un critère agro-environnemental sur des essais doses d'azote : vers son utilisation pour le raisonnement de la fertilisation azotée

V. Houllès<sup>1</sup>, B. Mary<sup>1</sup>, JM Machet<sup>1</sup>, M. Guérif<sup>2</sup>

1: Unité d'agronomie INRA Laon, rue Fernand Christ 02007 LAON Cedex

2: Unité CSE INRA Avignon, Site Agroparc 84914 AVIGNON Cedex 9

### Introduction

Cette étude se situe dans le cadre d'un projet de recherche en agriculture de précision (Guérif 2001) qui vise à développer un outil de préconisation spatiale de la fertilisation azotée d'une culture de blé basé sur un modèle de culture, STICS, et la télédétection. L'objectif est d'adapter la fertilisation azotée aux besoins de la culture à l'échelle intra-parcellaire de façon à maximiser à la fois le rendement et la teneur en protéine des grains et à minimiser les reliquats récolte. La solution choisie pour optimiser à la fois ces trois variables de sortie est d'utiliser une variable qui les combine, de type marge économique, appelée fonction objectif, qui doit être maximisée.

Une méthode doit donc être développée pour permettre à STICS de réaliser des préconisations de doses d'azote, voire de dates d'apports par le biais de cette fonction objectif. Cette méthode pourrait également servir hors du cadre de l'agriculture de précision. Un préalable à l'utilisation d'une telle méthode est d'évaluer la capacité du modèle à la fois (i) à simuler correctement les variables de sortie d'intérêt, le rendement, la teneur en protéine des grains et les reliquats post-récolte, ainsi que la marge économique qui combine ces trois variables et (ii) à prédire la dose d'azote qui maximise effectivement la marge économique (Wallach 2002).

### Matériel et méthodes

Afin d'évaluer la réponse de STICS à la dose d'azote et sa capacité à préconiser des doses d'azote, des essais menés sur cinq sites représentatifs de la diversité des conditions pédo-climatiques des régions de grande culture du nord de la France ont été retenus : un site de l'ITCF de Boigneville (91) (Laurent 2000), deux sites gérés par l'ITCF de Châlons-en-Champagne (51), à Thibie et à La Cheppe, un site de l'ITCF de La Minière (78) et le site de Chambry, support du projet agriculture de précision mené à l'INRA de Laon (02), (Guérif 2001). Les caractéristiques principales de ces essais sont décrits dans le tableau 1.

Essai	Années	Variété	Nbre de stations	Nbre traitements	Reliquats par traitement	Suivi de la culture
Boigneville (91)	1998	Soissons	10	5	Oui	Non
	1999	Soissons	10	5	Oui	Non
Thibie (51)	1994	Forby	1	7	Non	Non
	1995	Apollo	1	8	Oui	Non
	1998	Shango	1	8	Non	Non
	1999	Shango	1	9	Non	Non
La Cheppe (51)	2002	Shango	1	6	Oui	Oui
La Minière (78)	2002	Shango	1	9	Non	Oui
Chambry (02)	2000	Shango	1	6	Non	Oui
	2001	Shango	1	6	Non	Oui

**Tableau 1 :** Caractéristiques des différents traitements azotés utilisés pour évaluer la réponse de STICS à la dose d'azote.

Les reliquats post-récolte n'ont pas toujours été mesurés pour toutes les doses. Un suivi de la culture a été réalisé sur certains sites : ceux-ci ont servi pour partie à la calibration du modèle.

L'évaluation de la qualité de prédiction du modèle en fonction de la dose d'azote a été réalisée sur une fonction objectif qui combine les trois variables d'intérêt selon un critère s'apparentant à une marge

économique. En référence à Makowski (2001), le calcul de cette fonction objectif, notée  $M(d)$ , a été réalisé en fonction de la dose d'azote, notée  $d$ , de la façon suivante si on n'a pas d'information sur les reliquats azotés :

$$M_1(d) = g[P(d)] \cdot Y(d) \quad \text{a.d.} \quad \text{p/ha} \quad [1]$$

où :

-  $g[P(d)]$  représente le prix payé à la tonne de blé en fonction de sa teneur en protéine,  $P(d)$  obtenue pour la dose  $d$ , avec :

$$g[P(d)] = 114 \text{ p/t si } P(d) \geq 13\% \quad [2]$$

$$g[P(d)] = 108 + 2.44 \times [P(d) - 10.5] \text{ p/t si } 10.5\% \leq P(d) < 13\% \quad [3]$$

$$g[P(d)] = 108 \text{ p/t si } P(d) < 10.5\% \quad [4]$$

-  $Y(d)$  est le rendement obtenu pour la dose  $d$  ;

-  $a$  est le prix de l'engrais :  $a = 0.46 \text{ p/kgN}$

Dans le cas où des mesures de reliquats azotés ont été faites à la récolte, on peut inclure un critère environnemental dans le calcul de cette fonction objectif. La prise en compte des reliquats dans la marge peut se faire de manière hypothétique en supposant qu'il y aurait une taxe proportionnelle au reliquat jusqu'à un certain seuil au-dessus duquel le montant de la taxe serait fixe :

$$M_2(d) = g[P(d)] \cdot Y(d) \quad \text{a.d.} \quad \text{h}[R(d)] \quad \text{p/ha} \quad [5]$$

où :

$h[R(d)]$  représente la taxe payée pour un reliquat  $R(d)$  obtenu pour une dose  $d$ , avec :

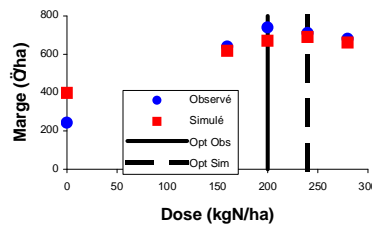
$$h[R(d)] = 76 \text{ p/ha si } R(d) \geq 50 \text{ kgN/ha} \quad [6]$$

$$h[R(d)] = 1.52 \times R(d) \text{ p/ha si } R(d) < 50 \text{ kgN/ha} \quad [7]$$

Une fois la qualité de prédiction du modèle évaluée par rapport à cette marge, il faut évaluer son aptitude à déterminer la dose d'azote optimale, *i.e.* celle qui maximise cette marge.

En première approche, la dose optimale a été déterminée comme celle qui, parmi les doses réellement expérimentées, a maximisé les marges, que ce soit dans le cas expérimental ou simulé (Fig. 1).

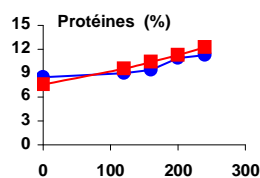
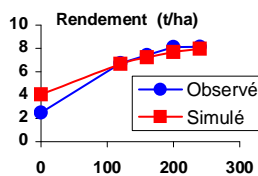
Enfin, une fois les doses optimales simulées et observées déterminées, il faut considérer quelle marge la dose optimale simulée aurait permis d'obtenir d'après les données expérimentales.



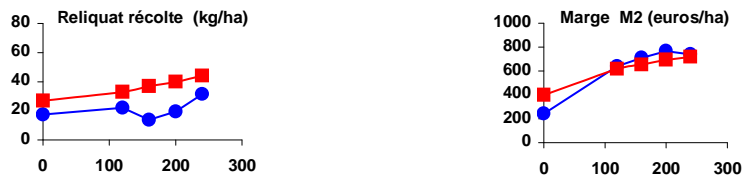
**Figure 1 :** Détermination de la dose d'azote optimale. Les droites verticales indiquent les doses d'azote optimales déterminées par les données expérimentales (trait plein) et par simulation (trait pointillé).

## Résultats

La figure 2 donne un exemple de l'évolution de la réponse du modèle à la dose d'azote pour les quatre variables considérées. Le rendement est bien simulé sauf pour la dose 0, la teneur en protéines également. La réponse de la marge ( $M_2$ ) est de ce fait relativement bien reproduite malgré la surestimation des reliquats. Néanmoins, la dose qui maximise la marge est de 200 kgN/ha pour les données observées, tandis que pour les données simulées, c'est la dose maximale, 240. La marge observée pour la dose de 240 kgN/ha est de 739 p/ha, contre 766 pour la vraie dose optimale. Ainsi, le modèle qui choisit la dose de 240 conduit à une perte de marge de 27 p/ha, soit 3.6%. La faible perte liée à une erreur de dose provient cependant essentiellement du fait que la réponse de la marge à la dose d'azote est assez plate.

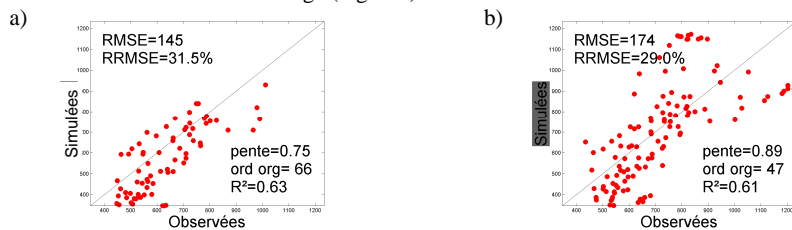






**Figure 2 :** Evolution du rendement, de la teneur en protéines, des RPR et de la marge observés et simulés en fonction de la dose d'azote de la station 1 de l'essai de Boigneville en 1998.

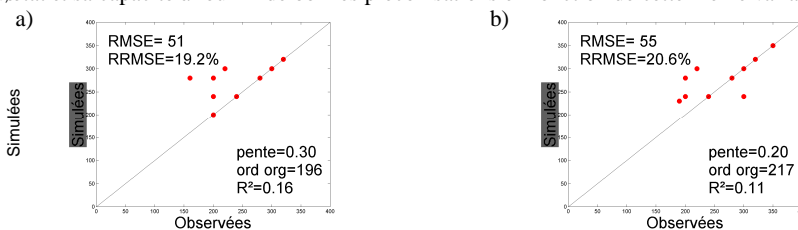
Considérons à présent le calcul des marges économiques sur l'ensemble des données ; il est à noter que le jeu de données de Boigneville représente 20 essais sur les 28 totaux. La figure 3-a représente les marges économiques mesurées et simulées pour lesquelles on a les mesures de reliquats (marges  $M_2$ ) et la figure 3-b les marges économiques  $M_1$  calculées dans toutes les situations (159), sans prendre en compte les reliquats. On simule la marge économique avec une erreur relative de 30%, ce qui semble indiquer que le modèle ne simule pas assez correctement la réponse du modèle à la dose d'azote. Le modèle tend à sous-estimer la marge (Fig. 3-a).



**Figure 3 :** Comparaison des marges (€/ha) simulées et observées dans le cas où l'on prend en compte les reliquats dans le calcul de la marge économique (a, 114 points) et sans les prendre en compte (b, 159 points).

Les figures 4-a et 4-b confrontent de même les doses optimales observées et simulées dans les cas avec prise en compte des reliquats (a) et sans (b). On ne voit pas l'ensemble des points (28 normalement dans la figure b) car certains sont confondus. Il s'avère qu'on détermine la bonne dose dans 15 cas sur 28, soit 54%. L'erreur sur la dose peut aller de 20 à 50%. La méthode de détermination de la dose optimale est en partie responsable de ces erreurs. On remarque une certaine tendance du modèle à choisir des doses supérieures aux doses optimales vraies, ce qui est lié au fait qu'il ne simule pas assez correctement la stagnation des rendements pour les doses les plus fortes. Lorsqu'on prend en compte les reliquats, cette tendance s'estompe néanmoins. Le modèle préconise cependant une dose trop forte dans 11 cas sur 28 et trop faible seulement dans deux situations.

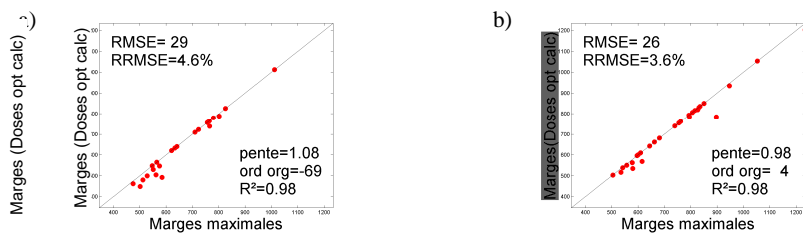
On peut remarquer l'absence de liaison directe entre la capacité de prédiction par le modèle d'une variable d'état et sa capacité à fournir de bonnes préconisations en fonction de cette même variable.



**Figure 4 :** Comparaison des doses optimales simulées et observées (kgN/ha) dans le cas où l'on prend en compte les reliquats dans le calcul de la marge économique (a, 22 essais) et sans les prendre en compte (b, 28 essais).

La figure 5 compare les marges maximales vraies (données observées) et les marges qu'on aurait obtenues en appliquant la dose préconisée par le modèle. Dans les cas où le modèle indique la dose exacte, ces marges sont

naturellement égales ; lorsque le modèle se trompe, les dernières sont inférieures aux premières. Ceci traduit le manque à gagner lié à l'utilisation du modèle pour choisir une dose par rapport à une situation où on connaîtrait *a priori* la dose optimale. On constate que les pertes dues aux erreurs du modèle sur les doses restent relativement faibles : 12% au maximum et 3% en moyenne. Mais ceci est essentiellement lié à la forme relativement plate de la réponse de la marge économique à la dose d'azote qui de ce fait pose la question de sa légitimité pour servir à déterminer des doses optimales.



**Figure 5 :** Comparaison des marges obtenues avec la dose préconisée par le modèle et les marges maximales vraies dans le cas où l'on prend en compte les reliquats dans le calcul de la marge économique (a) et sans les prendre en compte (b).

### Conclusion et perspectives

Lors de l'utilisation d'une variable synthétique pour déterminer une dose optimale par un modèle, le poids de l'erreur que commet celui-ci sur cette variable sur sa capacité de décision peut être modifié par le choix de ce critère. Par ailleurs, il serait intéressant d'évaluer la capacité du modèle à prendre des décisions non pas par rapport à une situation où on connaît *a priori* la dose optimale comme c'était le cas dans cette étude, mais par rapport à d'autres méthodes de décision, comme la méthode du bilan, ainsi que sa capacité à préconiser des doses au moment de l'appart, c'est-à-dire en faisant des hypothèses concernant le climat à venir.

Guérif M *et al.*, 2001, 3ECPA abstract, Montpellier 2001, Grenier G. and Blackmore S. eds.

Laurent 2000, Perspectives Agricoles n°262 6 novembre 2000 pp. 62-69.

Makowski *et al.*, 2001, Agronomy Journal, 93 :531-539.

Wallach 2002, Ecole-Chercheurs « Pour une bonne utilisation des modèles de culture » INRA

### Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement F Laurent, G Aubrion, Ph Gate et S Vautrin de l'ITCF pour nous avoir fourni les données doses d'azote et pour leur disponibilité.

## Utilisation du modèle Stics dans le contexte des sols limoneux profonds du site de Lavalette (Montpellier) sur maïs irrigué en aspersion et à la raie.

J.C. Mailhol et P. Ruelle

### Le contexte

Une culture de maïs variété SAMSARA a fait l'objet d'un suivi sur 5 années :1997, 1998, 1999, 2001 et 2002 sur le site expérimental de Lavalette au Cemagref de Montpellier. Différents traitements en matière de dose d'eau, de fertilisant ou de technique d'irrigation ont été mis en œuvre sur des sous parcelles aux caractéristiques de sol sensiblement différentes.

Le climat de type méditerranéen rend nécessaire l'irrigation du maïs. En effet, en année normale, une seule irrigation visant à assurer la levée ( 20 à 30 mm) nous permet d'approcher les 40 quintaux seulement (98,2000, 2001, 2002). A la faveur de quelques orages estivaux (1999) ou de pluies abondantes en début de cycle (1997) il est possible cependant d'avoisiner les 90 qx pour ces mêmes traitements.

Le sol de plaine alluviale est de tendance limoneuse ( $L[2-50\mu m] :45\%$ ). Les sous parcelles les plus proches du fleuve (le Lez) ont une teneur en argiles plus faible (18% en moyenne sur la couche 0-60 cm) que les plus éloignées (22% en moyenne). Cette distinction de texture explique la différence des réserves utiles entre le traitement bien irrigué (ETM) et le traitement en sec soient RU = 150 et 180 mm/m respectivement.

L'aspersion est le système d'irrigation utilisé durant les 5 années. En 1999 et 2001 l'irrigation à la raie a été également appliquée sur des sous parcelles de 130 m de longueur comportant une quarantaine de raies chacune, le système d'alimentation étant la rampe à vanettes.

### Irrigation et fertilisation

Les traitements conduits en aspersion, ont reçu des doses de fertilisant adaptées aux exigences de la culture, à l'exception du traitement zéro N. Les doses totales d'azote varient en moyenne de 100 à 200 kg/ha selon les teneurs initiales d'azote du sol avant le semis. A l'exception de l'année 98 (200 kg/ha) elles ont été fractionnées en deux apports. Dans le cas de l'irrigation à la raie, un premier apport a été effectué juste avant semis en 1999 ( 70 kg/ha ) et un deuxième juste avant traçage de sillons (90 kg/ha). En 2001, en raison de teneurs initiales d'azote du sol élevées (180 à 200 kg/ha) un seul apport de 50 kg/ha a été effectué un jour avant semis. Chaque année un traitement zéro N est conduit en aspersion. Le mode de fertilisation adopté dans le cas de l'irrigation à la raie génère un profil d'azote très hétérogène dans une section transversale avant la première irrigation. En effet lors du traçage des raies le soc déplace l'azote du centre du sillon pour le concentrer sur la partie haute des billons. Dans ce contexte, la question de la pertinence d'un modèle tel que Stics se pose pour simuler à la fois le transfert de soluté et rendre compte de l'efficacité d'utilisation de l'azote par la plante (Mailhol et al., 2001). Aussi, calage et validation de Stics auront-ils trait pour l'essentiel au cas de l'aspersion. Les apports d'eau en aspersion varient d'une vingtaine de mm pour les traitement en sec aux environs de 300 à 380 mm pour les traitement conduits à l'ETM. Concernant le gravitaire, les doses sont de 450 mm et 190 mm respectivement pour les 2 traitements différenciés en 1999. Elles sont de l'ordre de 300 mm et de 200 mm en 2001 respectivement pour les traitements les plus contrastés.

### Calage et validation de Stics

Il est apparu nécessaire de procéder au calage des paramètres gouvernant la croissance (LAI) de la plante (maïs variété SAMASARA). En effet, ceux relatifs à la variété de maïs (Furio) jugée à priori la plus proche, combinés aux paramètres initiaux relatifs à l'absorption d'azote ont donné lieu à des simulations peu satisfaisantes. La version Stics-feuille donnait toutefois des résultats corrects concernant la matière sèche (uniquement) mais continuait à surestimer fortement la quantité d'azote absorbée par la plante. Le calage des paramètres régissant l'évolution du LAI sur le traitement ETM

de 1998 a permis d'améliorer les résultats concernant le rendement de 1998. On a dû cependant intervenir au niveau des paramètres gouvernant l'absorption d'azote en réduisant sensiblement le paramètre ADILMAX. On a ainsi amélioré la simulation de la teneur en azote de la plante sur le traitement ETM98 (230 kg/ha simulé 247 mesuré) ainsi que sur le zéro N00 (91 mesuré, 94 simulé), la minéralisation simulée ayant en outre été jugée satisfaisante. La figure 1 ci après présente les résultats du calage (ETM98) et de la validation (ETM99) de la simulation de l'indice foliaire. D'une manière générale Stics simule une décroissance trop rapide du LAI. La validation du LAI sur les traitements en sec des 2 années est cependant beaucoup moins satisfaisante.

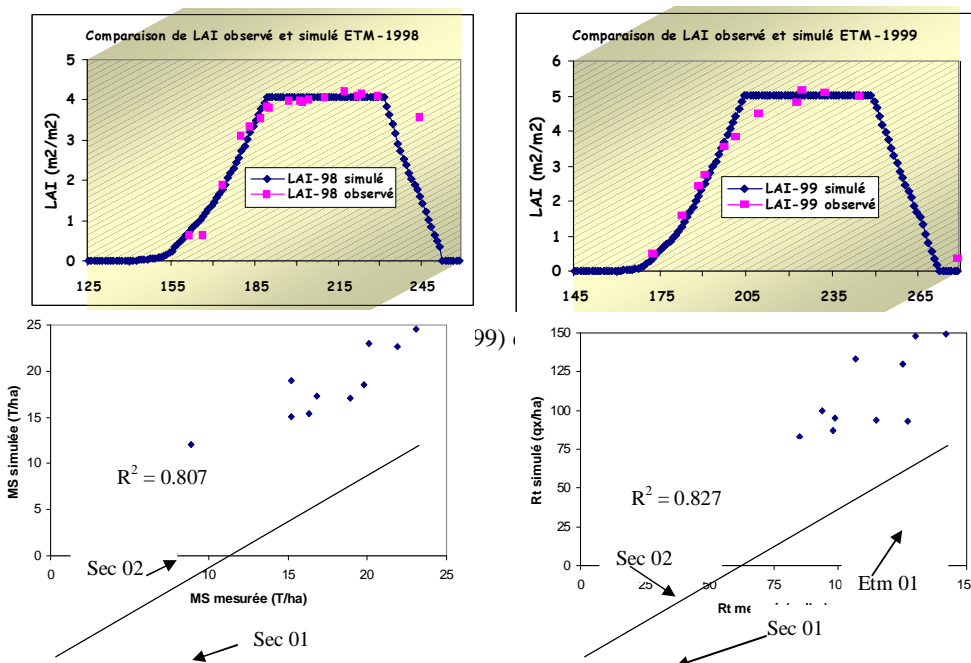
La croissance racinaire initialement fixée à 0.15 cm/°C jour a dû être réduite à 0.14 cm/°Cjour. Stics simulait en effet une profondeur maximale Px de 138 cm contre Px de 120 cm environ observée sur l'ensemble des traitements hormis le sec. De cette modification résulte une Px simulée de 125 cm plus conforme aux observations.

Le tableau 1 ci après témoigne d'un accord satisfaisant entre ETR simulée et estimée selon la méthode du plan de flux nul hormis pour les cas du 0N.

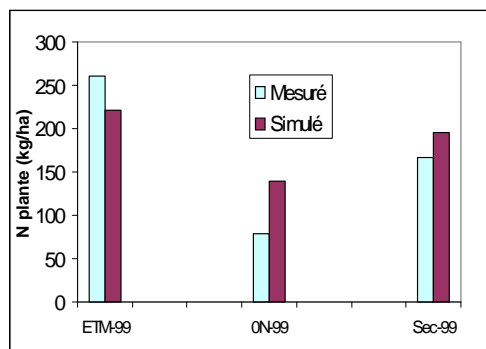
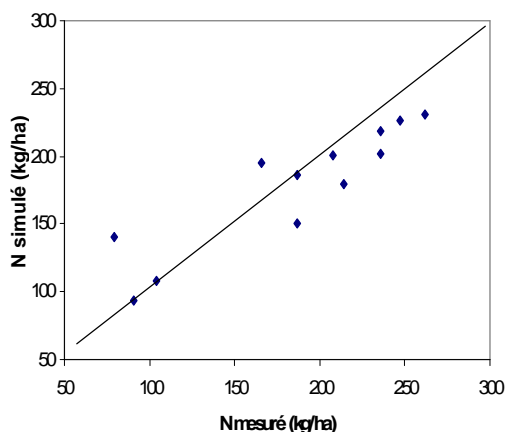
**Tableau 1** ETR entre semis et récolte en 1999

	ETM	0N	Sec
Simulé	533	528	393
Mesuré	515	472	395

Les figures 2 et 2b présentent les simulations du rendement en aspersion. Le traitement en sec de 2001 n'a pu être simulé en raison d'une humidité initiale trop faible dans la couche 0-30 cm (13% hum pond) alors que la plante a effectivement levé. Les figures 3a et 3b présentent les simulations de la teneur en azote de la plante. Les rendements des traitements 0N (non représentés sur les figures 2 et 2b) tant de 98 (MS : 10.3 T/ha contre 13.4 simulé) que de 99 (12 T/ha contre 17.8 simulé) sont fortement surestimés par le modèle. Dans l'ensemble on constate une légère tendance à la sous estimation hormis les traitements 0N sec de 1999. Le suivi tensiométrique tend à montrer que le drainage au delà de 140 cm est négligeable voire nul sur la plupart des traitements en aspersion hormis en 2002 en fin de cycle et sur le traitement sur irrigué de 1998 ( 526 mm). Sur ce dernier Stics simule un drainage de 126 mm et un lessivage de 43 kg/ha, drainage et lessivage estimés par bilan étant respectivement de 190 mm et de 80 kg/ha. Le modèle prédit la valeur potentielle du rendement : 145 qx contre 127 mesuré.



**Fig. 2a.** Rendement en matière sèche totale (T/ha)      **Fig. 2b.** Rendement grain (qx/ha)



**Fig. 3a** Azote dans la MST sites aspersion (97-99)      **Fig. 3b** Azote dans la MST (asp. 99)  
(MST := tiges, feuilles, et épis à la récolte)

#### Application au cas de l'irrigation à la raie

Les rendements simulés dépassent les 140 qx quels que soient les sites de mesures du traitement où les rendements quoique assez homogènes dans le sens amont aval de la parcelle plafonnent à 127 qx. L'azote dans la plante simulée par Stics est de 240 kg/ha sur le site amont du traitement Ta (traitement amélioré), ce qui au dire du modèle laisse supposer une bonne efficacité d'utilisation de l'azote. Cependant le reliquat d'azote observé en fin de cycle au sommet des billons et les valeurs des rendements mesurés, laisseraient plutôt supposer le contraire. Il convient de noter que le suivi tensiométrique a par ailleurs témoigné d'une absence de stress hydrique susceptible d'être à l'origine de l'écart de rendement par rapport au traitement ETM. Ce même suivi tensiométrique atteste également d'une absence de drainage durant le cycle sur ce même traitement Ta. Les concentrations en azote total de la solution recueillie dans les bougies poreuses sur le site le plus enclin à générer du drainage (aval des raies bouchées) sont faibles jusque à la mi-Septembre. Le lessivage n'est donc pas là encore la cause de l'écart de rendement. On constate un écart très sensible au niveau de la teneur en azote mesuré dans la plante en début Août entre le traitement à l'ETM (208 kg/ha) et les sites en gravitaire (163 kg/ha en moyenne). Cet écart se réduit cependant fortement à la récolte où il n'est plus que de 30 kg/ha en moyenne. L'écart notable constaté en cette période du cycle pourrait s'expliquer par une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote dans le cas de l'aspersion que dans le cas de l'irrigation à la raie. Le reliquat d'azote constaté en fin de cycle en partie haute des billons peut constituer une explication de cet état de fait. Il est vrai que de faibles tirants d'eau associés à de faibles durées d'irrigation sont des conditions peu favorables à faire migrer l'azote concentré de la partie haute des billons vers les couches sous-jacentes du sol. Par contre il a été établi que les flux hydriques sous la raie et sous le billon étaient identiques en dessous de la zone racinaire et, un modèle comme Stics est donc apte à simuler les flux pour une section raie-billon au cours de la campagne d'irrigation gravitaire.

### Conclusion

En aspersion, sur les sols limoneux profonds de Lavalette, Stics simule correctement les tendances concernant les rendements et les teneurs en azote dans la plante. La matière sèche du traitement en sec 2002 est fortement surestimée (12 contre 7.8T/ha) et le rendement en sec de 2001 ne peut être quant à lui simulé en raison d'une humidité initiale trop faible au semis compromettant la levée selon le modèle. Des conditions moins drastiques devraient être imposées pour pallier ce problème. Assujettir par exemple la germination à la teneur en eau d'une couche de sol d'épaisseur supérieure (de l'ordre de 30 cm) pourrait permettre de résoudre ce problème.

Le modèle surestime le rendement et l'azote dans la plante sur le traitement sans apport d'azote (0N). La minéralisation est simulée de façon acceptable ainsi que le bilan hydrique.

Les conditions expérimentales ne nous ont cependant pas permis de tester le modèle quant à son aptitude à simuler correctement le lessivage d'azote, des dispositifs expérimentaux lourds et coûteux sont nécessaires pour cela. C'est cependant sur cet aspect important qui mobilise l'intérêt des utilisateurs ayant des préoccupations environnementales, que doit porter l'effort de validation de l'outil. Il conviendra au préalable de s'assurer du caractère satisfaisant de l'adéquation entre teneur en azote de la plante mesurée et simulée.

Dans le cas de l'irrigation à la raie on a montré (Nemeth, 2001) que le couplage de Stics au modèle Raieopt simulant l'irrigation à la raie, pouvait être considéré comme un outil pertinent pour simuler le bilan hydrique dans la couche 0-140 cm et le rendement de la culture lorsque l'azote n'est pas un facteur limitant. Dans le cas contraire, et en liaison avec la technique de fertilisation consistant à effectuer un apport d'engrais juste avant le traçage des sillons, ce couplage est inadapté pour prédire le devenir de l'azote dans le sol et son impact éventuel sur le rendement (Mailhol et al., 2001)

### Références

Mailhol, J.C., Ruelle, P., Nemeth, I., 2001. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrig. Sci* (2001) 20: 139-147.

**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 205p + Annexes.

## Modélisation de la minéralisation, la nitrification et le transfert des nitrates dans les sols tropicaux acides

J. Sierra<sup>1</sup>, N. Brisson<sup>2</sup>, D. Ripoche<sup>2</sup> et C. Noël<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INRA, Unité Agropédoclimatique (Guadeloupe), <sup>2</sup>INRA, Unité Climat, Sol et Environnement (Avignon)

### Introduction

Des travaux menés en Guadeloupe sur la dynamique de l'azote dans les sols ferrallitiques, ont mis en évidence trois facteurs qui doivent être considérés afin de bien estimer la biodisponibilité de ce nutriment :

- i- la réponse de la minéralisation à la température est décalée vers des valeurs plus élevées que celles reportées pour les sols des régions tempérées. Ce décalage est dû principalement à la protection de la matière organique du sol par les oxydes et les hydroxydes de fer et d'aluminium (Sierra and Marbán, 2000).
- ii- l'oxydation de l'ammonium, issu de la minéralisation et des apports azotés, n'est jamais totale, et sa vitesse dépend du pH, de la température et de la teneur en eau du sol (Sierra et al., 2001).
- iii- le transfert de nitrates n'est pas directement proportionnel au drainage (Noël, 2001), ce qui est lié, d'une part, à leur rétention partielle dans les charges positives des argiles et, d'autre part, à leur séquestration dans les microagrégats.

Dans ce papier nous présentons une synthèse des formalismes utilisés pour introduire ces trois facteurs dans le modèle STICS, et les résultats d'une expérimentation au champ (sol nu et cultivé avec maïs), réalisée afin de tester les sous-modèles Eau et Azote de STICS.

### Modifications au sous-modèle Azote et choix de modélisation

#### i- Réponse de la minéralisation à la température

Ceci n'est pas strictement une modification au modèle, mais concerne la reparamétrisation de deux des variables de l'équation originale décrivant l'effet de la température sur la minéralisation : la température de référence de minéralisation TREF ( $\approx 15^\circ\text{C}$  pour les sols tempérés,  $24^\circ\text{C}$  pour le sol ferrallitique testé), et le facteur empirique FTEM (entre 0.08 et 0.13 pour les sols tempérés, 0.22 pour le sol testé).

#### ii- Vitesse de nitrification

La nitrification est estimée en considérant un effet multiplicatif, sans interaction, du pH, de la température (T) et de la teneur en eau du sol (H) :

$$f_{\text{nitrif}} = f_{\text{pH}} \times f_{\text{T}} \times f_{\text{H}} \quad \text{avec : } 0 < f_{\text{T}}, f_{\text{H}} < 1, \text{ et } 0 < f_{\text{pH}} < f_{\text{max-pH}} < 1, \\ \text{et donc : } 0 < f_{\text{nitrif}} < f_{\text{max-pH}}$$

Le facteur  $f_{\text{max-pH}}$  tient compte du fait que la nitrification n'est jamais complète, même dans les sols ferrallitiques chaulés (p.e.  $\text{pH} > 6$ ). La quantité journalière d'azote nitrifié ( $Q_{\text{nitrif}}$  en kg N/ha) est calculée :  $Q_{\text{nitrif}} = f_{\text{nitrif}} \times Q_{\text{NH}_4}$ , où  $Q_{\text{NH}_4}$  (kg N/ha) est la quantité d'ammonium dans le sol. Les valeurs seuils de pH, de température et de teneur en eau, nécessaires au calcul des différents facteurs, sont issues des expérimentations de laboratoire.

#### iii- Rétention des nitrates

Ce facteur est décrit par un seul paramètre  $C_{\text{critNO}_3}$  ( $\text{kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ eau cm}^{-1} \text{ sol}$ ), qui représente la quantité seuil des nitrates pour le démarrage du transfert avec l'eau de drainage. La rétention est considérée constante en fonction de la profondeur.

#### iv- Choix de modélisation

Nous avons considéré que l'absorption végétale de chaque forme d'azote (ammonium et nitrates) est proportionnelle à leur concentration, p.e. il n'y a pas d'affinité spécifique. Compte tenu que le modèle ne décrit pas l'effet de l'acidité sur la croissance végétale, nous avons utilisé la version STICS-feuille (Ripoche et al., 2001), laquelle simule la croissance de la plante à partir des valeurs observées de LAI. Les simulations ont été réalisées pour la période semis - récolte dans les parcelles cultivées (105 jours).

## Expérimentation

L'expérimentation au champ a été réalisée au Domaine Duclos de l'INRA Antilles-Guyane. Nous avons utilisé deux parcelles cultivées en maïs, l'une correspond au sol naturel acide de la région, et présente une toxicité aluminique relativement importante (nommée MAC, pH 4.4, 2.1 cmol  $Al^{3+}$   $kg^{-1}$ ), la deuxième parcelle correspond au même sol mais elle a été chaulée en 1997 et ne présente pas de toxicité (nommée MCH, pH 5.0, 0 cmol  $Al^{3+}$   $kg^{-1}$ ). Une troisième parcelle, similaire à MCH, a été conservée nue pendant l'expérimentation (nommée SNU), et a été employée afin d'ajuster quelques paramètres du modèle, p.e.  $Zesx$ ,  $Q0$ ,  $Ccrit_{NO_3}$  et  $f_{max-pH}$ . Nous avons utilisé une population de maïs tropical (Spectral) moyennement tolérante à l'acidité, avec une densité de 50000 plantes  $ha^{-1}$ . Les parcelles cultivées ont reçu 150 kg N  $ha^{-1}$  sous la forme d'urée (90 kg N  $ha^{-1}$ , 7 jours après le semis, et 60 kg N  $ha^{-1}$  à floraison). Les variables mesurées lors de l'expérimentation sont : i- climat : pluie, rayonnement, température et humidité de l'air, vitesse du vent ; ii- plante : LAI, biomasse aérienne, et sa concentration en azote, composantes du rendement ; iii- sol : azote minéral (ammonium et nitrates) et humidité du sol jusqu'à 0.8 m de profondeur, et les paramètres nécessaires à la caractérisation des couches du sol.

## Résultats et Discussion

### Sous-modèle Eau

Le modèle a décrit raisonnablement les changements des teneurs en eau dans les trois parcelles analysées, p.e. pour la couche 0-0.4 m,  $R^2 = 0.78$  pour SNU, 0.85 pour MAC, et 0.64 pour MCH. Les valeurs estimées de  $Zesx$  (0.9 m) et  $Q0$  (40 mm) sont relativement élevées, ce qui implique que tout le profil du sol contribue d'une façon significative à l'évaporation. Cela est le résultat d'un processus d'ascension capillaire qui se déroule principalement lors de la saison sèche (30 jours dans le cas de notre expérimentation). Ce phénomène n'est pas explicitement pris en compte par STICS. Pourtant, nous estimons que le considérer *via* les variables  $Zesx$  et  $Q0$ , est une simplification raisonnable compte tenu que la période sèche est relativement courte et qu'elle n'introduit pas un biais important dans les estimations.

### Sous-modèle Azote

La valeur ajustée de  $f_{max-pH}$  (0.5) confirme que l'acidité est la limitation principale de la nitrification. D'après les résultats obtenus, la valeur maximale de  $f_{nitrif}$  a été 0.09, c'est à dire, un maximum de 9% de l'ammonium présente dans le sol a été nitrifié par jour. Pour cette raison des quantités importantes d'ammonium sont toujours retrouvées dans le sol, p.e. 40 kg N- $NH_4$   $ha^{-1}$  étaient présentes dans les parcelles cultivées deux mois après la première application d'urée. La valeur estimée de  $Ccrit_{NO_3}$  (0.05 kg N- $NO_3$   $ha^{-1}$   $mm^{-1}$   $cm^{-1}$ ) correspond à une rétention d'environ 20 kg N- $NO_3$ -N  $ha^{-1}$  pour le profil analysé. Nos simulations ont montré que le fait de ne pas considérer ce facteur induit une surestimation de lessivage de l'ordre de 50 kg N  $ha^{-1}$ .

Dans la parcelle SNU, le modèle a bien décrit les changements temporels de la quantité totale d'azote minérale ( $R^2 = 0.95$ ), la distribution nitrates-ammonium ( $R^2 = 0.85$ ), et le transfert des nitrates ( $R^2 = 0.96$ ). Le modèle a aussi correctement simulé la dynamique de l'azote minéral dans la parcelle



MAC (sol très acide). Concernant la parcelle MCH (sol légèrement acide), tandis que les changements de l'azote minéral total ont été bien simulés, le modèle a largement surestimé la quantité de nitrates et, conséquemment, sous-estimé la quantité d'ammonium. La minéralisation estimée (environ 20 kg N dans les deux parcelles ) a été plus faible qu'en SNU (52 kg N ha<sup>-1</sup>), ce qui a été dû essentiellement aux différences dans la température du sol. Par ailleurs, l'absorption d'azote par la plante a été correctement estimée dans les deux parcelles.

Des expérimentations postérieures à celle présentée ici, ont montré que la population de maïs utilisée possède une sélectivité positive par rapport aux nitrates en absence de toxicité aluminique. En revanche, il est bien connu que l'acidité et la présence d'aluminium affectent particulièrement l'absorption de cet ion. Notre hypothèse est donc que la surestimation de la quantité de nitrates dans la parcelle MCH est liée à leur absorption préférentielle, et donc à la simplification faite dans le modèle concernant l'absence d'affinité spécifique. Le bon ajustement observé sur la parcelle MAC serait ainsi un artefact créé par l'effet de l'acidité sur l'absorption des nitrates.

### **Conclusions**

Les résultats ont indiqué que les modifications introduites dans le modèle ont été pertinentes et que celui-ci a eu un comportement général satisfaisant. La plupart de ces modifications concernent des paramètres déjà présents chez STICS, ce qui rend assez simple l'utilisation de l'option "nitrification" du fichier "Sol". En revanche, la prise en compte de la préférence nutritionnelle est plus difficile car elle dépend simultanément de plusieurs facteurs, y compris quelques-uns qui ne sont pas actuellement considérés par le modèle (p.e. disponibilité de phosphore, niveau de la toxicité aluminique). Une réflexion a été entamée afin d'analyser la faisabilité d'introduire ce phénomène dans le modèle.

### **Références citées**

- Noël C 2001 DEA, Université Paris XII, Paris.  
Ripoche D, Weiss M and Prevot L 2001 Proc. Second International Symposium on Modelling Cropping System. pp 169-170.  
Sierra J, Fontaine S and Desfontaines L 2001 Aust. J. Soil Res. 39, 519-534.  
Sierra J and Marbán L 2000 Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 2002-2010.

## About the crop temperature as simulated by the STICS model

N. Brisson<sup>1</sup>, B. Seguin<sup>1</sup>, L. Prevo<sup>1</sup>, C. Durr<sup>2</sup>, P. Cellier<sup>3</sup>, G. Richard<sup>2</sup>

INRA Avignon<sup>1</sup>, Laon<sup>2</sup>, Grignon<sup>3</sup>, , Department Environment and Agronomy (France)

In order to account for the thermal environment of the crop, a daily crop temperature is used in the STICS crop model (Brisson et al., 1998) to drive the response functions of the crop to temperature and plays the role of the upper limit for the soil temperature calculation. In this work, simulations and measurements of crop temperature are compared.

### Methods

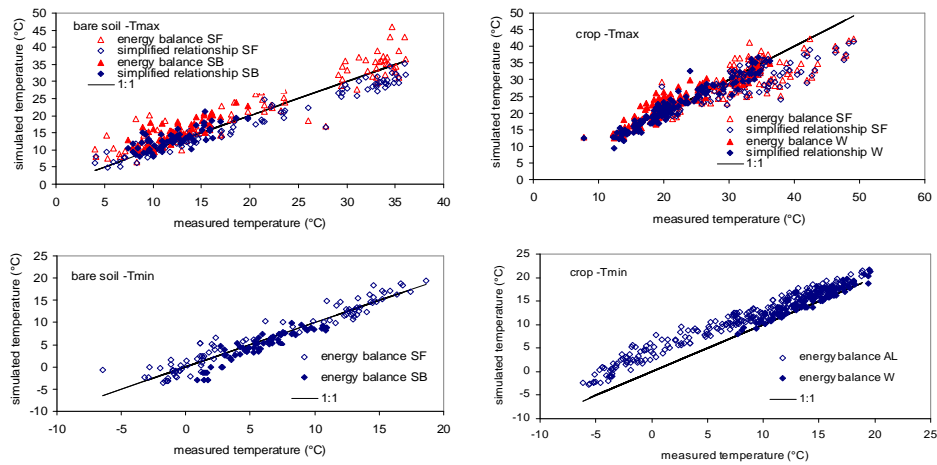
The daily crop temperature is computed as the arithmetic mean of the maximal and the minimal crop temperatures. It is necessary to first calculate net radiation. Atmospheric radiation is calculated from the Brutsaert formula, using temperature and moisture content as input variables. Albedo evolves between the soil value and the vegetation value and soil albedo varies according to the type of soil, the humidity in the surface layer. Soil radiation is a function of crop temperature (a variable that is to be calculated) and is therefore the object of an iterative calculation based on a convergence criterion of 0.5°C.

Then two calculation methods are proposed (simplified relationship and energy balance) depending on the availability of climatic data. The first approach is based on a relationship between midday surface temperature and daily evaporation and accounts for the surface roughness (Riou et al., 1988). It is hypothesised that the minimal crop temperature coincides with that of the air. The second approach is based on two instantaneous calculations made at the time of the maximum and minimum temperature. Atmospheric radiation is assumed to be constant throughout the day, whereas soil radiation is calculated with the maximal and minimal temperatures (same iterative processes as above). At the end of the night, evapotranspiration and radiation values are zero and the soil heat flux is calculated as an empirical function of wind under the cover and of minimal net radiation. Total radiation and evaporation in the midday sun are estimated assuming that the fluxes evolve sinusoidally during the day. Night-time wind is assumed to be equal to 0.5 x daily mean wind.

The crop temperature is compared to radiative or soil temperatures, which are the solely measurements that can be faced to the calculated values. Data sets of radiative temperatures (daily minimum and maximum) come from the Alpilles-Reseda experiment in the South of France (Prevo et al., 1998). Values of three fields are used : the ÷water stressed÷ sunflower (SF) field which was cropped from May to September and was bare soil in the other periods, the wheat (W) and the alfalfa (AL) pasture fields were instrumented during the crop cycle only. Data sets of soil temperature (sensors in the first 3 cm) come from experiments devoted to the emergence dynamics of sugar beet (SB) in the north of France (Durr et al., 2001).

### Results

The simplified relationship seems more robust than the energy balance with lower RMSE even if the bias in cases of elevated temperatures is higher. Some questions can arise about the significance of the maximal radiative temperature when the plants are sparse (case of sunflower) because in this case the radiative temperature is different from the aerodynamic temperature within the canopy and hence different from the result of the plant-soil energy balance (Prevo et al., 1994). The energy balance does not succeed in correctly simulating the night temperatures, essentially for planted surfaces because of the limits in correctly describe temperature profiles during the night. The imposed lower threshold for windspeed during the night prevents the model from erratic results but generates a systematic over-estimation.



measurements			radiative temperature				soil temperature
surface			bare soil (winter and summer)	sunflower	alfalfa	wheat	bare soil (spring)
Maximum temperature	simplified relationship	RMSE	2.88 °C	5.05 °C	4.27 °C	1.83 °C	2.19 °C
		bias	-65%	-64%	-34%	4%	23%
	energy balance	RMSE	3.93 °C	5.02 °C	5.82 °C	2.54 °C	3.47 °C
		bias	29%	-46%	48%	30%	65%
Minimum temperature	air temperature	RMSE	1.66 °C	1.33 °C	3.66 °C	1.60 °C	2.37 °C
		bias	17%	51%	92%	39%	-27%
	energy balance	RMSE	1.72 °C	1.32 °C	3.53 °C	1.56 °C	1.71 °C
		bias	8%	50%	90%	36%	-42%

Table 1 : Statistics of the comparison between measured and simulated crop temperature. Bias is estimated following Willmott (1981) recommendations.

Nevertheless, it is important to analyse this precision in view of the use of the crop temperature within the model, which is more or less under a cumulative form, either directly for phasic development, leaf and root elongations, germination and maturation of harvested organs or indirectly by the sum of the simulated mechanisms like net photosynthesis and mineralisation process in the soil. The table 2 shows that the differences with air can be not significant or even negative if we use averages. The results are better for the maximum temperatures but the energy balance exaggerates those differences for planted surfaces. The weight of the errors on minimum temperatures is important. As most of the mechanisms concerned are diurnal, it could be worth ponderating the extremes in the calculation of a daily temperature .

crop		sunflower	wheat	alfalfa	sugar beet
period		crop cycle	tillering to harvest	4 growing cycles	emergence
measured	avg	249	-7	-306	-3
	max	743	123	209	-11
simplified relationship	avg	124	68	107	18
	max	289	135	211	42
energy balance	avg	165	128	435	55
	max	354	266	899	112

Table 2 : Differences between experimental or simulated temperature sums and the equivalent air temperature sum for average or maximum values

## Simulation du microclimat dans STICS en vue de l'interfaçage avec un modèle épidémiologique : exemple du couple tournesol-phomopsis

Philippe DEBAEKE (1), Nadine BRISSON (2), Marianne MERIC (1), Jacques MOINARD (3)

(1) INRA, Unité d'Agronomie, BP 27, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

(2) INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, Domaine St Paul, 84914 Avignon cedex 9

(3) Service Régional de la Protection des Végétaux (SRPV) "Midi-Pyrénées", Cité Administrative, Bât. E, Bd Armand Duportal, F-31074 Toulouse Cedex

Le modèle épidémiologique Asphodel (SRPV Midi-Pyrénées) est utilisé pour prédire les épisodes de contamination et la nuisibilité potentielle de *Diaporthe helianthi*, agent responsable du phomopsis du tournesol (Delos *et al.*, 2000). La simulation des épidémies tient compte de données climatiques (pluie, température, humidité relative) et agronomiques (stade du tournesol, sensibilité variétale). Ainsi, dans la zone couverte par un poste météorologique, le conseil de traitement fongicide sera identique pour une variété et une date de semis. Or, nous avons montré que l'état végétatif du tournesol pendant la phase de sensibilité maximale à la contamination (grossissement du bouton floral) pouvait être très variable, pour une variété donnée, selon la fertilisation azotée et la densité de peuplement, avec pour conséquence une variation de la fréquence de tiges attaquées allant de 0 à 100 % sur un même site et pour une même date de semis (Debaeke et Raffaillac, 1996). On peut avancer l'hypothèse d'une variation microclimatique en fonction de l'indice foliaire de la culture : les peuplements denses, bien alimentés en azote et en eau, à fort indice foliaire, maintiendraient une humidité relative (HR) supérieure dans le tiers inférieur du peuplement, offrant des conditions plus favorables à la réussite des contaminations et à la progression des symptômes vers la tige.

En conséquence, nos objectifs de travail sur la période 1998-2001 ont été les suivants :

- étudier la variation de HR (et de la température) pour différents couverts de tournesol variant par le génotype, l'irrigation, l'alimentation azotée et la densité de peuplement
- simuler la contamination potentielle à l'aide d'Asphodel en utilisant les données de microclimat (HR, température) mesurées dans le couvert (par comparaison avec les données à 2 m).
- confronter les épisodes de contamination simulés aux dynamiques d'apparition des symptômes sur feuilles
- modéliser l'effet du couvert de tournesol sur le microclimat à l'aide de STICS.

Des enregistrements du microclimat (humidité relative, température) au sein d'une gamme de couverts de tournesol ont été réalisés pendant 4 ans (1998-2001) sur le site de l'INRA d'Auzeville (Hte Garonne) (Debaeke *et al.*, 2000 ; Meric, 2002). Il a été observé que l'humidité relative à 40 cm du sol variait fortement selon l'indice foliaire de la culture (effet de l'azote et de la densité de peuplement) et les conditions d'irrigation.

Un suivi de la dynamique épidémique réalisé en 2000 et 2001 en conditions de contamination renforcée a permis de valider les périodes de contamination prévues par le modèle Asphodel.

La prise en compte de HR dans le couvert et non dans l'air (en entrée du modèle Asphodel) a permis de mieux représenter les effets de la conduite de culture sur la contamination foliaire et le % de tiges présentant des symptômes de phomopsis.

L'effet du couvert de tournesol sur les valeurs moyennes journalières de température et d'humidité relative a été modélisé et introduit dans le modèle STICS, préalablement paramétré pour le tournesol (Ghiloufi, 1999). Ce formalisme est aujourd'hui inclus dans STICS 5.0 (Brisson *et al.*, 2003) et représenté de façon schématique à la Fig.1. Cette représentation permet de reproduire l'effet de la conduite de culture (eau, azote, peuplement) sur le microclimat (rayonnement, température, déficit de saturation) en donnant une place importante à l'indice foliaire. La variation du LAI est en effet

particulièrement grande chez le tournesol (1.5 à 6 à la floraison) selon la conduite et le génotype. La température de culture est déduite du bilan d'énergie ou de la formule simplifiée de Seguin et Itier (1983). Ces deux méthodes utilisent l'estimation des flux évaporatifs (bilan hydrique) et le calcul de la radiation nette. Le déficit de saturation au sein du couvert est estimé par la formule de Shuttleworth et Wallace (1985). L'humidité relative est déduite du déficit de saturation interne en utilisant la température de culture.

Le **Tableau 1** montre comment le modèle reproduit les valeurs moyennes d'HR en 2001 (13/06 au 1/08) pour 4 conduites variant par le LAI à la floraison : HR augmente avec le LAI maxi.

La valeur moyenne journalière d'HR simulée par STICS a été comparée aux observations issues des capteurs (**Fig.2**). La valeur du  $r^2$  est de 0.85 avec une sous-estimation des faibles valeurs de HR (< 75 %). L'erreur moyenne est de 4.1 % avec des valeurs plus élevées pour les parcelles à valeurs extrêmes de LAI. Si l'on ne conserve que les valeurs d'HR > 75 % qui nous intéressent pour prédire le développement du champignon, l'erreur n'est plus que de 3.1 %. Rappelons que la précision des capteurs est de 1 à 2 % selon la gamme d'humidité.

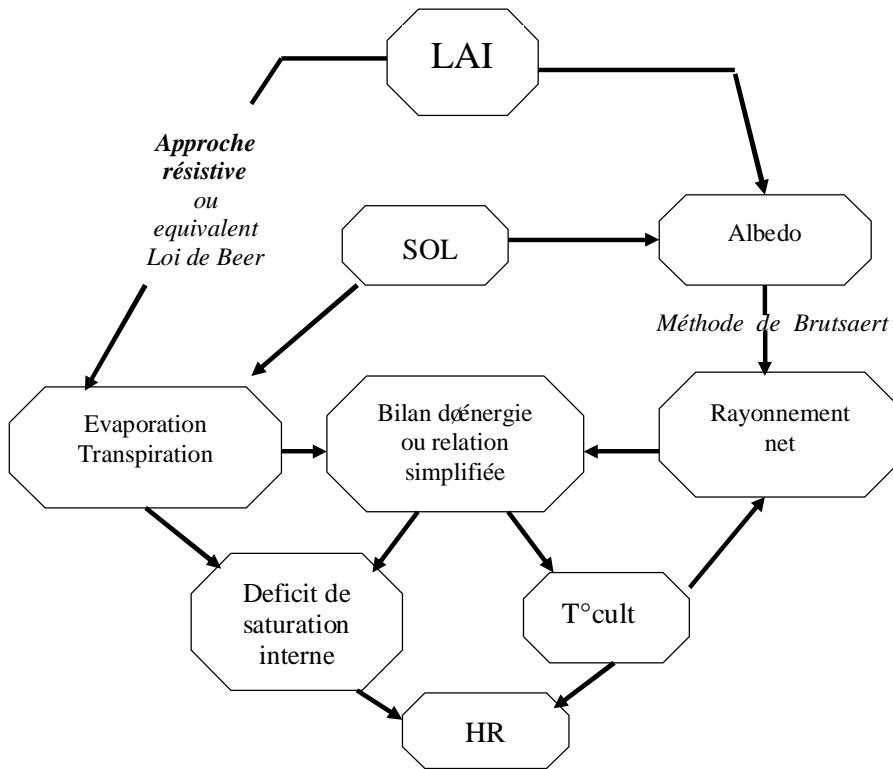
En vue de l'interfaçage avec le modèle Asphodel, des données horaires de température et d'HR sont nécessaires (tri-horaires dans la pratique). Pour déclencher une contamination significative, le modèle se base en effet sur le nombre d'heures pendant lesquelles le seuil de 90 % d'humidité relative est dépassé. Or le passage de STICS en données horaires, s'il est réalisable (par la modélisation de la température du point de rosée), suppose de nouvelles hypothèses et introduit de nouvelles erreurs. La qualité de la représentation est actuellement moins bonne qu'à l'échelle journalière ( $r^2 = 0.74$ , erreur de 10.2 % et de 9.2 % pour les valeurs d'HR > 75 %). On sous-estime en particulier le nombre d'heures où HR > 90 %.

Pour 4 conduites de culture en 2001, les valeurs horaires d'HR ont été utilisées pour calculer à l'aide d'Asphodel l'indice de nuisibilité potentielle (INP) en se basant sur les observations des capteurs et sur les simulations de STICS. Les valeurs d'INP ont également été confrontées aux % de tiges attaquées observées au champ (**Tableau 1**). Dans tous les cas (HR à 2 m, HR dans le couvert, HR STICS), on reproduit bien les périodes de contamination. Par contre STICS ne parvient pas à discriminer les conduites sur l'INP en particulier pour les situations les plus couvrantes et ce contrairement aux capteurs. L'imprécision est encore trop forte pour une utilisation opérationnelle de STICS se substituant à la donnée fournie par les capteurs. En effet, en utilisant les valeurs d'HR fournie par STICS on sous-estime les risques d'apparition du phomopsis pour les forts LAI et l'on pourrait conclure à l'inutilité d'une protection fongicide. Des problèmes d'interfaçage restent à résoudre également pour mettre en correspondance sorties de STICS et entrées climatiques du modèle Asphodel.

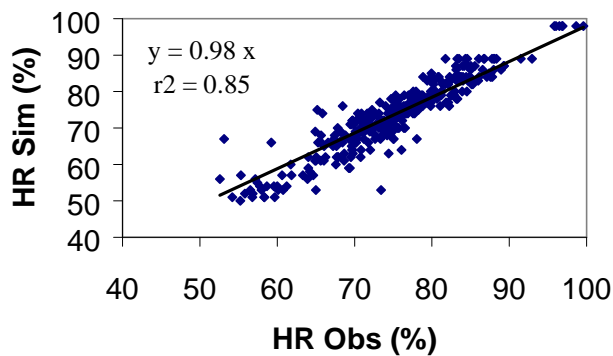
**Tableau 1** Valeurs d'HR et d'indice de nuisibilité potentiel pour 4 couverts de tournesol variant par le LAI et le % de tiges gravement atteintes par le phomopsis

LAI max	0.8	1.8	3.3	4.9
HR moy (STICS), %				
calcul journalier	68	71	72	73
calcul horaire	71	74	75	75
INP (HR capteurs)	29	29	36	37
INP (HR STICS)	30	30	30	30
% tiges encerclantes	21	28	33	36

**Fig.1.** 6 Etapes de calcul du microclimat sous couvert (les données journalières de climat à 2 m sont connues)



**Fig.2** 6 Comparaison de HR simulée par STICS (moyenne journalière) et observée à 40 cm du sol (thermohygromètres) entre le 13/06 et le 1/08/01 à Auzeville (31)



## Références

- BRISSON N. et al., 2003.** An overview of the crop model STICS, *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
- DEBAEKE P., RAFFAILLAC D., 1996.** Light interception as an indicator of leaf area index and risk of diseases in sunflower. *Helia*, 19, (24), 1-16.
- DEBAEKE P., DELOS M., MOINARD J., BERAULT S, LAMBERT R., 2000.** Prise en compte du couvert de tournesol dans la simulation des épidémies de *Diaporthe helianthi* par le modèle ASPHODEL. *Annales 6ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes*, AFPP, Tours (France), 251-258.
- DELOS M., MOINARD J., DEBAEKE P., PERES A., 2000.** ASPHODEL : Modèle de simulation des épidémies de Phomopsis du tournesol (*Diaporthe helianthi*). *Annales 6ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes*, AFPP, Tours (France), 251-258.
- 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.
- MERIC M., 2002.** *Evaluation de l'effet du couvert de tournesol sur la dynamique épidémique de Diaporthe helianthi : approche expérimentale et par modèle*, Mémoire de fin d'études, ESA Purpan, Mai 2002, 86 p.
- SEGUIN B., ITIER B., 1983.** Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int.J.Remote.Sens.* 4, 371-383.
- SHUTTLEWORTH W.J, WALLACE J.S., 1985.** Evaporation from a sparse canopy ó an energy combination theory. *Q.J.R. Meteor. Soc.* 111, 839-855.

## **Impact du réchauffement climatique sur la phénologie des arbres fruitiers dans la vallée du Rhône**

**Marjorie DOMERGUE (1), Nadine BRISSON (1), Jean-Michel LEGAVE (3), Vincent MATTHIEU (4), Bernard BACULAT (2), Bernard SEGUIN (2),**

(1) : *Unité Climat Sol Environnement, INRA Avignon*

(2) : *Unité Agroclim, INRA Avignon*

(3) : *Unité GAFL, INRA Avignon*

(4) : *CTIFL Balandran*

Les observations faites sur une grande partie des vergers de la Vallée du Rhône, suite à plusieurs hivers doux de ces dernières années ont mis en évidence :

- des chutes de bourgeons floraux plus fréquentes (à la suite de nécroses florales automnales et hivernales),
- des dates de floraison plus précoces, pouvant occasionner des dégâts de gel,
- une concordance de floraison moins bien assurée dans une situation de pollinisation croisée ;

Nous avons donc entrepris d'étudier l'éventuel impact des changements climatiques sur la phénologie de 3 espèces fruitières : le pommier, l'abricotier et le pêcher, dans la Vallée du Rhône. Deux à trois variétés par espèces ont été choisies, afin de représenter différentes gammes de précocité.

Dans un premier temps, nous avons collecté les données phénologiques disponibles sur des séries anciennes, qui ont permis de confirmer les observations sur l'avance de la précocité de floraison. A partir de ces observations, il a été possible de caler les modèles d'estimation des besoins en froid pour lever la dormance et en chaleur pour arriver à la floraison pour chacune des variétés choisies, permettant par la suite de simuler, à l'aide du modèle de culture STICS, les variables suivantes : date d'entrée en dormance, date de levée de dormance, date de floraison et pourcentage de dégâts de gel, ceci pour différentes séries climatiques :

- une série ancienne (1965 à 1989) ;
- une série actuelle, avec l'hypothèse d'un réchauffement amorcé (1989 à 2001) ;
- deux séries s'appuyant sur des scénarios de réchauffement pour la fin du siècle (2070-2100), fournies par le Laboratoire de Météorologie dynamique (LMD), et soumises à un générateur climatique, permettant d'introduire dans la seconde une variabilité vraisemblable.

La comparaison du comportement phénologique des variétés choisies d'un scénario climatique à l'autre, en différents sites de la Vallée du Rhône, nous a permis de dégager les grandes tendances quant à l'évolution des 4 variables phénologiques précédemment citées en cas de réchauffement : on peut, en particulier, constater qu'une élévation des températures provoquerait une floraison de plus en plus précoce, augmentant considérablement les dégâts de gel printanier, phénomène d'autant plus marqué pour les zones les plus au Sud de la Vallée du Rhône, et pour les variétés à floraison précoce. Les variétés exigeantes en froid rencontreraient quand à elles des problèmes de satisfaction de leur besoins en froid dans ces mêmes zones.

En s'appuyant sur les résultats obtenus lors de cette étude préliminaire et dans le cadre de la mise en place d'une Mission sur le climat et l'effet de serre à l'INRA, on se propose maintenant de l'élargir à toute la France, en constituant une base de données phénologiques sur un plus grand nombre d'espèces.



Cette base, alimentée par des organismes en réseau (pour l'instant l'INRA, le CTIFL, et les stations d'expérimentations régionales, avec la possibilité d'élargir à des agriculteurs intéressés), sera mise à disposition de ces organismes, avec les données météorologiques correspondantes. Elle sera gérée par l'unité Agroclim de l'INRA d'Avignon.

Les séries de données phénologiques ainsi regroupées devraient permettre de fournir des informations complétant les données climatiques et de porter un diagnostic plus complet sur les impacts possibles d'un réchauffement climatique sur la production fruitière.

**Mots clés : Réchauffement climatique, espèces fruitières, dormance, floraison, dégâts de gel, série climatique, base de données.**

## Impacts des changements climatiques sur la qualité du blé dur

Sophie Lebonvallet, Nadine Brisson

INRA, Unité Climat, Sol et Environnement, Site Agroparc, Avignon

### Introduction

Le blé dur a pour débouché quasi exclusif l'industrie semoulière et pastière. Mais les critères qui définissent la qualité du blé dur sont multiples, qu'il s'agisse de critères technologiques ou de critères organoleptiques : mitadinage, indice de jaune, tenacité, moucheture, brunissement à la cuisson, etc. Cependant la teneur en protéines du grain de blé semble être un indicateur central de la qualité car il est fortement corrélé aux autres critères (Garcia, 2001).

Le déterminisme de la teneur en protéines des grains de blé est complexe, dépendant à la fois du milieu climatique et édaphique, de la fertilisation azotée et de la variété. L'équilibre entre ces trois éléments est recherché par de nombreux acteurs de la filière avec des préoccupations à la fois agricoles (préserver le rendement, améliorer la qualité) et environnementales (minimiser la lixiviation des nitrates).

Or cet équilibre est susceptible d'être remis en question par les changements climatiques qui ont déjà commencé depuis une dizaine d'années, et qui selon les prévisions à l'échelle globale, devraient s'accroître (GIEC, 2001). Des études, nombreuses sur les céréales, ont déjà démontré qu'il fallait s'attendre à des raccourcissements de cycle liés à l'augmentation des températures et à des augmentations de rendement induites par la fertilisation carbonée de l'atmosphère ; des études expérimentales ont également démontré la détérioration de la teneur en azote et en protéines des graminées dans de telles conditions (Lorgeou *et al.*, 2000, Délécolle *et al.*, 1999, Morison et Lawlor 1999). Ce changement progressif de contexte climatique fragilise les programmes de sélection et les conseils techniques à la profession.

L'objectif du travail est de se doter d'un outil permettant de raisonner les interactions qui déterminent la teneur en azote des grains en tenant compte des changements climatiques et de l'appliquer dans le sud est de la France. Il s'inscrit dans un programme de recherche sur la qualité du blé dur entamé depuis 3 ans à l'INRA, et s'appuie sur une expérimentation multilocale en région Provence Alpes Côte d'Azur, avec 11 parcelles et 7 variétés représentées.

Nous utilisons à ces fins le modèle de culture STICS (Brisson *et al.*, 1998), qui simule les bilans trophique, hydrique et azoté des cultures en général et du blé dur en particulier. Il prend en compte l'effet d'une augmentation de CO<sub>2</sub> sur la photosynthèse et la transpiration de la plante. Si ce modèle donne satisfaction pour prédire les rendements, il reste très approximatif pour la teneur en azote du blé (Brisson *et al.*, 2002; Garcia, 2001).

Notre étude a ainsi été constituée de trois volets, cherchant à répondre à 3 séries de questions :

1) Amélioration du modèle STICS dans ses fonctionnalités "azote" sur la base du jeu de données 2001 (première année de l'expérimentation PACA). En effet, actuellement le paramétrage du module azote, déterminant les besoins du système sol-racines, est celui du blé tendre. De plus, il est supposé être indépendant de la variété. Peut-on alors proposer un paramétrage blé dur ? Est-il raisonnable de penser que certains paramètres "azote" dépendent de la variété ? Un jeu de paramètres azote pour le blé dur sera proposé, sur lequel s'appuieront les 2 volets suivants.

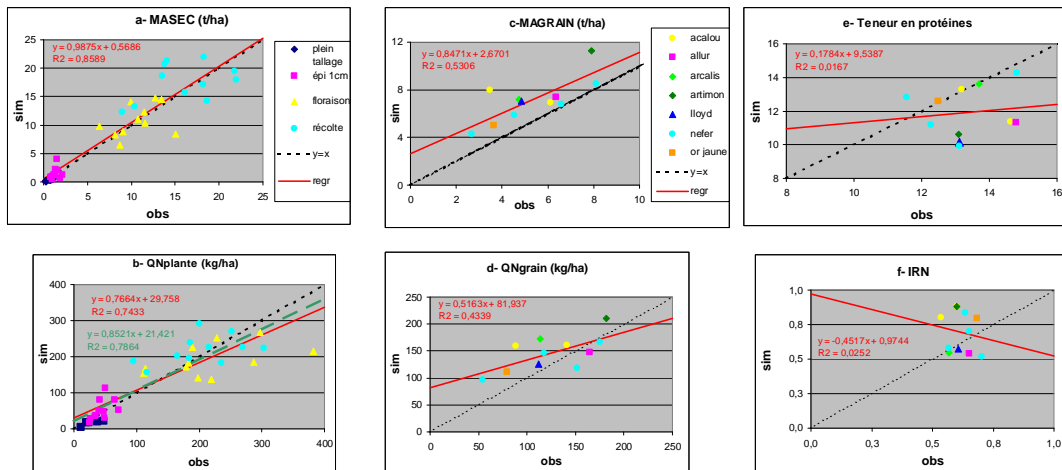
2) Etudes par simulation des interactions génotype \* environnement. Certaines variétés sont mieux adaptées à certains milieux, soit en terme de niveau ou de stabilité des rendements, soit en terme de qualité. Le modèle est-il capable de reproduire ces adéquations préférentielles ? Nous retiendrons 2 variétés aux performances opposées pour le dernier volet de travail

3) Etudes par simulation des effets des changements climatiques sur le rendement et l'azote des grains sur des sites situés en région PACA. Nous utiliserons des scénarios climatiques issus du modèle de Météo France, concernant à la fois le climat actuel et le climat modifié sous hypothèse d'un doublement de la concentration en CO<sub>2</sub>. Les impacts des changements climatiques sont-ils équivalents pour les 2 variétés choisies ? Sur l'ensemble des sites étudiés ? Quelles peuvent être les conséquences sur les programmes de sélection ?

#### 1) Optimisation des paramètres "azote"

Dans un premier temps, nous avons donc cherché à optimiser les paramètres déterminant l'élaboration de la quantité d'azote dans le grain. On sait que celle-ci dépend de la migration de l'azote vers le grain, mais surtout de la quantité d'azote de la plante entière, elle-même liée aux besoins de la plante (croissance en biomasse et courbe de dilution) et à l'offre du sol (caractéristiques des racines). Au final, nous avons ainsi retenu en préfloraison 5 paramètres se rapportant à la morphologie et à la physiologie racinaire, ainsi qu'à la courbe de dilution, et en postfloraison 2 paramètres se rapportant à la courbe de dilution. Ces paramètres ont été optimisés par rapport à la quantité d'azote de la plante entière, tout d'abord spécifiquement pour le blé dur, puis par variété de blé dur.

Pour le jeu de paramètres blé dur, nous avons obtenu de grandes différences par rapport au blé tendre en terme de nombre de racines produites, plus important, et de front racinaire, plus fourni. La vitesse de croissance du front racinaire est en revanche restée la même. De plus, l'affinité du blé dur pour l'azote semble être plus forte que celle du blé tendre, et l'effet de dilution plus tardif. Sont présentées ci-dessous les comparaisons entre observés et simulés avec ce nouveau jeu de paramètres pour la biomasse (a), la quantité d'azote plante (b), le rendement (c), la quantité d'azote grain (d), la teneur en protéines (e) et l'indice de récolte azote (f).



**Figure 1- Comparaison entre observé et simulé avec les paramètres blé dur**

Les biais et dispersion obtenus sont améliorés par rapport à ceux obtenus avec les paramètres du blé tendre sur le même jeu de données. On remarque que les variables les mieux simulées sont la biomasse et la quantité d'azote plante entière tout au long du cycle. Ensuite, on note à la récolte une surestimation du rendement, entraînant un biais dans l'estimation de l'azote grain. Enfin, ces mauvaises estimations sont à l'origine d'un biais et d'une dispersion très importants pour la teneur en protéines et l'indice de récolte azote, qui, en tant que variables rapport, cumulent les erreurs de chacun des termes.

En revanche, notre optimisation par rapport aux variétés de blé dur n'a pas donné de résultats concluants ; nous avons donc continué notre étude avec le jeu de paramètres blé dur.

## 2) Etude des interactions Génotype \* Environnement

Nous avons simulé des cycles de culture pour 7 variétés, sur 2 sites variables en terme d'altitude, de sol, de climat et d'itinéraire technique. On réalise sur les valeurs obtenues (biomasse, rendement, quantité d'azote plante, quantité d'azote grain, teneur en protéines) une analyse de variance à 2 facteurs avec interactions, pour voir si les différences obtenues sont dues plutôt au facteur variété ou au facteur site.

Les principaux résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Figure 2- Résultats de l'ANOVA (S effet significatif, NS effet non significatif) et**

**pourcentage de la Somme des Carrés Totale**

Variable	Effet Site	Effet Variété	Interaction Site * Variété
MAGRAIN	S (59,3%)	NS (2,4%)	S (21,2%)
MASEC	S (82,5%)	NS (2,2%)	NS (1,8%)
QNGRAIN	S (91,5%)	S (5,4%)	S (2,6%)
QNPLANTE	S (98,5%)	NS (0,3%)	NS (0,4%)
Teneur en protéines	NS (1,5%)	NS (0,5%)	S (43,3%)

On voit ainsi que l'essentiel de la variabilité est expliquée par le facteur site (regroupant les effets du lieu, du sol et de l'itinéraire technique) et non par le facteur variété. En ce qui concerne les interactions entre ces 2

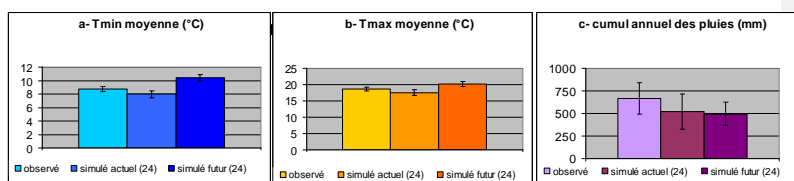
facteurs, elles ne sont significatives que pour ce qui concerne le grain, à savoir le rendement, la quantité d'azote grain et la teneur en protéines, mais pas à l'échelle de la plante entière.

### 3) Impacts des changements climatiques

Nous avons travaillé à partir du modèle régional à résolution variable (environ 60km pour la France) développé par Michel Déqué à Météo France. La base de ce scénario, débutant en 1860, est une simulation de 240 ans avec un modèle couplé océan-atmosphère. A partir de 1990, on maintient constante la distribution des gaz à effet de serre et on augmente chaque année de 1% le taux de gaz carbonique. Autour de 2060, ce taux a donc doublé par rapport au taux initial. Nous avons utilisé 5 points de ce modèle correspondant à des zones céréalières du quart sud est de la France. Pour chaque point, on dispose quotidiennement des températures minimales et maximales, des précipitations, du rayonnement solaire, de l'humidité relative et du vent. Ces valeurs ont été obtenues selon 2 simulations différentes, une simulation de contrôle actuelle reconstituant le climat moyen entre 1960 et 1989, et une simulation future entre 2070 et 2099 avec un doublement du taux de CO<sub>2</sub>.

Nous avons tout d'abord commencé par vérifier la validité des données climatiques utilisées, c'est-à-dire par voir si l'impact du changement climatique est bien plus grand que l'erreur sur le climat présent. Nous avons utilisé pour cela une série observée entre 1960 et 1989 pour un de nos 6 points, et les comparaisons sont présentées ci-dessous :

**entre climats moyens annuels observé, simulé actuel, et simulé futur**

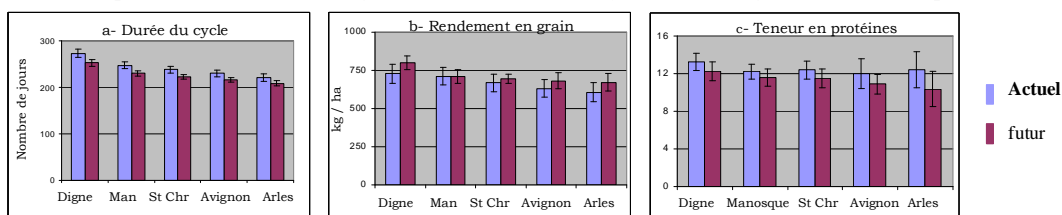


On a vérifié par un test de Student que l'impact du scénario futur sur les températures était bien plus important que le biais sur le modèle actuel. En revanche, dans le cas des précipitations, on a trouvé que les différences entre climat observé et climat simulé actuel étaient significatives. Nous avons donc corrigé ce biais avant de procéder aux simulations des cycles de culture.

Ces simulations ont été réalisées sur chacun des points pour 2 variétés, et selon 2 itinéraires techniques. On observe ensuite les différences obtenues en terme de durée du cycle, rendement et teneur en protéines du grain. Les résultats étant similaires dans les 4 cas, nous ne présentons ici pour les 5 points d'étude (Digne, Manosque, St Christol, Avignon, Arles) que ceux obtenus pour une variété et un itinéraire technique.

**Figure 4- Comparaison des valeurs obtenues entre climat simulé actuel et climat simulé futur**

On remarque ainsi une diminution significative de la durée du cycle (due à l'augmentation des températures, et



ce même malgré une moindre satisfaction des besoins en froid), une augmentation significative des rendements (due à l'augmentation de la fertilisation carbonée, et ce même malgré la moindre durée du cycle), et enfin une diminution significative de la teneur en protéines et donc de la qualité. Ces résultats correspondent à ceux prévus par les différents scénarii de changements climatiques.

### Conclusion

Le but de ce travail était, à partir de données obtenues dans la région PACA, de se doter d'un outil capable de modéliser correctement une des composantes les plus importantes de la qualité du blé dur, la teneur en protéines, et de prévoir les effets des changements climatiques sur le cycle, le rendement et la qualité de la plante.

Nous avons réussi à rendre le modèle plus performant dans son fonctionnement azoté global par la mise en place d'un jeu de paramètres spécifiques au blé dur. Toutefois, certaines faiblesses du modèle sont apparues au cours de l'étude, et demandent encore des améliorations. Tout d'abord, une surestimation des rendements due à un poids de 1000 grains simulé trop important. Ensuite, un biais dans l'estimation de la quantité d'azote du grain, qui laisse à penser qu'il faudrait retravailler la migration de l'azote vers le grain en

phase de remplissage. Enfin, une erreur très grande dans l'estimation des variables se présentant sous forme de rapport, qui cumulent les erreurs des 2 membres du rapport. On a également vu apparaître des limites aux scénarios de changements climatiques actuels, avec encore des problèmes de biais par rapport aux conditions observées, et en attente d'un passage à une résolution plus faible. Toutefois, les résultats de nos travaux de simulation ont confirmé les tendances concernant les impacts des changements climatiques, à savoir principalement une augmentation des rendements et une baisse de la qualité. C'est à partir de telles prévisions que devront s'orienter les programmes de sélection variétale d'ici quelques années.

L'ensemble de cette étude a globalement permis d'émettre plusieurs hypothèses quant au fonctionnement (en particulier azoté) du blé dur. Ces hypothèses demandent à être confirmées par des expérimentations complémentaires, telles que l'étude de la composante génétique de l'élaboration de la qualité du blé dur, ou une éventuelle composante variétale des paramètres.

### Bibliographie

- BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.-H., RUGET F., NICOLLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.-M., MEYNARD J.-M., DELECOLLE R., 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18**, 311-346.
- BRISSON N., RUGET F., GATE P., LORGEOU J., NICOLLAUD B., TAYOT X., PLENET D., JEUFFROY M.-H., BOUTHIER A., RIPOCHE D., MARY B., JUSTES E., 2002. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, **22**, 69-92.
- DELECOLLE R., SOUSSANA J.-F., LEGROS J.-P., 1999. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **85**, **4**, 45-51.
- GARCIA DE CORTAZAR ATAURI I., 2001. Méthodologie de l'analyse de la qualité du blé dur en région méditerranéenne. Mémoire de fin d'études, ISARA Lyon / INRA Avignon, 59p.
- LORGEOU J., PLANTON S., DELECOLLE R., RUGET F., POLLACSECK M., TARDIEU F., 2000. Réchauffement du climat, un nouveau défi pour le maïs de demain. *Perspectives agricoles*, **260**, 22-28.
- MORISON J.I.L., LAWLOR D.W., 1999. Interactions between increasing CO<sub>2</sub> concentration and temperature on plant growth. *Plant, Cell and Environment*, **22**, 659-682.

### Sites internet

- <http://www.agora21.org/mies/chan-clim1.html> : 1999-2002,  
Michel PETIT (Ecole Polytechnique), Rappel des principaux résultats du GIEC concernant l'effet de serre,  
Hervé LE TREUT (Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS), L'augmentation anthropique des gaz à effet de serre, un problème global,  
Michel DEQUE (Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques), Modélisation numérique des changements climatiques,  
Richard DELECOLLE (Unité de Bioclimatologie, INRA Avignon), Pierre-Alain JAYET (LESPA, INRA Grignon) et Jean-François SOUSSANA (Unité d'Agronomie, INRA Clermont-Ferrand), Agriculture française et effet de serre, quelques éléments de réflexion  
<http://www.ipcc.ch> : Intergovernmental Panel on Climate Change  
(GIEC : Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'évolution du Climat)  
WG I "Climate Change 2001: The Scientific Basis"  
WG II "Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability"  
WG III "Climate Change 2001: Mitigation"  
"Climate Change 2001: Synthesis Report"  
[http://www.proclim.unibe.ch/Reports/IR/IPCC/IPCC\\_F\\_WGI.html](http://www.proclim.unibe.ch/Reports/IR/IPCC/IPCC_F_WGI.html) : 2001, Groupe de travail I du GIEC,  
Résumé à l'intention des décideurs, aspects scientifiques de l'évolution du climat  
<http://www.senat.fr/rap/r98-346/r98-346.html> : 1998-1999, Serge LEPELTIER, Maîtriser les émissions de gaz à effet de serre, quels instruments économiques ?

## Risque environnemental en culture de laitue sous abri



### risque environnemental en culture de laitue sous abri

Présentation et intérêts du modèle STICS  
comme outil de diagnostic



Ch. Raynal-Lacroix, Ctif ó P. Bertuzzi, INRA ó  
D. Cavaillé, ENSIACET, N. Brisson, D. Ripoche, INRA

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.

Dans ce cadre, le modèle générique STICS 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 du lessivage des nitrates sous culture en comparant les valeurs simulées par le modèle et les valeurs obtenues expérimentalement.

### LES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

3 tunnels 5 m x 30 m et 1 site de mesure (ou placette) de 4 m x 10 m par tunnel  
1 placette de 4 m x 10 m, site des mesures, par tunnel-Identification des placettes : R1, R2, R3

Variété : Locness (obteneur : Vilmorin)

Densité : 11,1 plantes/m<sup>2</sup>

Plantation : 12 avril 2002 (mottes, stade 2 feuilles vraies óplanches sans paillage)

Récolte : 3 juin 2002

Caractéristiques du sol :

A titre d'exemple, résultats d'analyses de la placette R1, sur l'horizon 0-25 cm (H1)

Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	PH eau	Mat. Org.	Azote total	CEC Metson	Capacité de rétention	Point de flétrissement permanent
g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg		%	%	meq/100 g	%	%
81	76	71	308	451	5,4	1	0,6	5	11,28	3,59

Apports d'ammonitrate à deux dates : 3 mai (123 JJ) et 14 mai (134 JJ), correspondants respectivement à 33 et 37 kg d'azote/ha soit un total de 70 kg/ha pour la placette R1.

Comparativement, les autres placettes ont reçu 76 kg/ha (R2) et 64 kg/ha (R3).

## ACQUISITION DE DONNEES

Données Climatiques	Analyse de sol 3 horizons : H1 0-25 cm, H2 25-45 cm, H3 45-60 cm (10 carottes terre par échantillon)	Suivis plante  (10 plantes par placette)
Par jour T° air + sol Humidité de l'air Rg	Avant mise en culture Densité (méthode du cylindre) Analyse physico chimique complète Par semaine Azote nitrique (horizons : H1, H2, H3) Azote ammoniacal (H1) Taux d'humidité (horizons:H1,H2,H3)	Par semaine Matière fraîche Matière sèche Azote total Surface au sol de la salade Profils racinaires A la récolte : nitrate

## LES RESULTATS DES SIMULATIONS ó COMPARAISON AVEC LES DONNEES OBSERVEES

Les résultats de la modélisation sont analysés par rapport aux valeurs expérimentales avec une évaluation statistique des simulations. Ainsi pour chaque variable on calcule : l'écart moyen (MD) et l'écart relatif moyen (RMD), l'écart quadratique moyen (RMSE) et l'écart quadratique relatif moyen (RRMSE), l'efficacité du modèle (EF).

Pour des questions pratiques, les résultats des simulations présentés ici concernent la placette R1.

### **Taux de recouvrement, production de biomasse et prélèvements en azote**

Les simulations des variables : taux de recouvrement, production de matière sèche et prélèvements en azote, soulignent la qualité de réponse du modèle. Les valeurs simulées reproduisent bien les données observées, analyse confortée par les résultats de l'évaluation statistique (tableau 1).

A titre d'exemple sont présentés les résultats de la simulation des prélèvements en azote (kg/ha) comparés aux données observées (figure 1).

**Tableau 1 : Critères statistiques d'évaluation des simulations óR1-**

	<b>MD</b>	<b>RMD</b>	<b>RMSE</b>	<b>RRMSE</b>	<b>EF</b>
Taux de recouvrement	0,03	0,07	0,06	0,13	0,97
Matière sèche (t/ha)	-0,05	-0,07	0,09	0,11	0,99
Prélèvements en azote (kg/ha)	-2,20	-0,09	3,00	0,11	0,99
Stock d'azote minéral					
H1 (horizon 0 ó 25 cm)	-9,50	-0,34	11,10	0,39	0,61
Epaisseur sol 0-60 cm	-9,30	-0,15	15,20	0,24	0,48

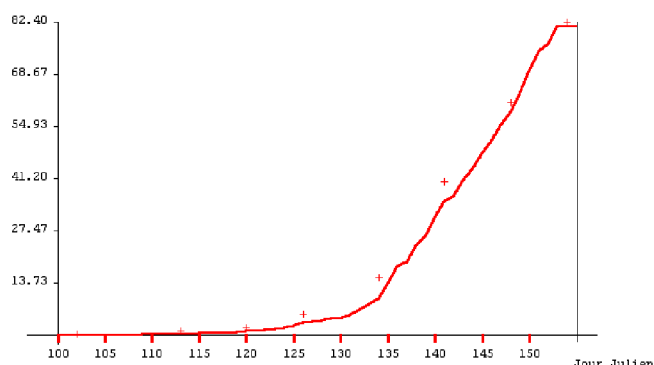


Figure 1: Evolution de la quantité d'azote prélevé (kg/ha)  
 — valeurs simulées + valeurs observées

Le poids de ces variables sur les simulations des stocks d'eau et d'azote, puis des flux correspondants, est tel que la qualité des données simulées doit être assurée.

Concrètement, ceci s'est traduit par un travail sur plusieurs paramètres d'entrée du modèle. Cette étape franchie, les variables intéressant l'humidité du sol, le stock d'azote minéral dans les trois horizons, puis le drainage et le lessivage des nitrates hors du système de culture ont été successivement étudiées et les résultats des simulations confrontés aux données "vraies" acquises expérimentalement sur le terrain.

### Flux hydriques

Les drainages à 60 cm obtenus par simulation sont comparés aux valeurs observées (figure 2). L'essentiel des sorties d'eau du système se limite à la première partie du cycle ; le modèle tend à reproduire qualitativement les phénomènes observés. Toutefois le drainage simulé, cumulé sur la période de culture, reste inférieur aux données expérimentales sur les trois placettes : 38 à 46 mm pour les valeurs simulées contre 69 à 79 mm pour les valeurs observées.

Enfin, le modèle ne permet pas de simuler d'éventuelles remontées capillaires. Cette limite de STICS est mise en évidence dans les conditions expérimentales de cet essai.

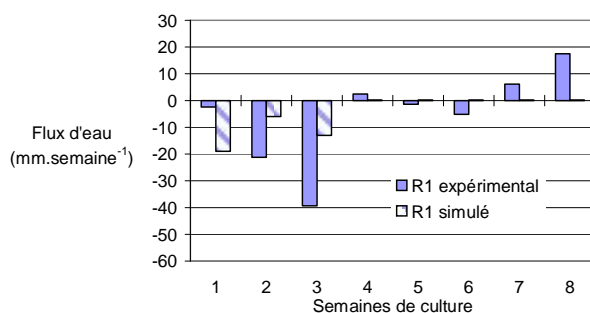


Figure 2 : Drainages à 60 cm  
 résultats des simulations et des observations

### Stocks d'azote et lessivage des nitrates

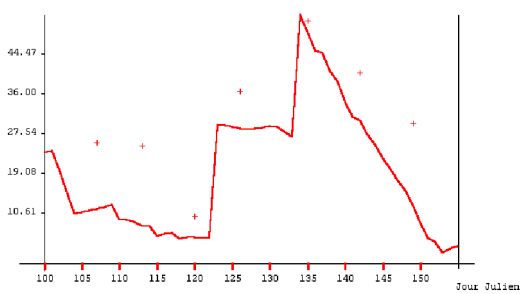


Le profil des stocks d'azote simulés dans l'horizon 1 est en accord avec celui des valeurs observées (figure 3). Les amplitudes dans l'évolution des stocks reproduisent bien les apports d'azote les 3 mai (123 jours juliens) et 14 mai (134 jours juliens). L'évolution cohérente des stocks par rapport aux points de mesure se traduit par une valeur d'efficacité du modèle relativement correcte (tableau 1). En revanche le modèle sous estime les stocks. Il faut relativiser ces résultats par rapport à la variabilité des mesures de stock d'azote dans un sol dont la variation observée est généralement supérieure à 20-30% de la valeur moyenne estimée.

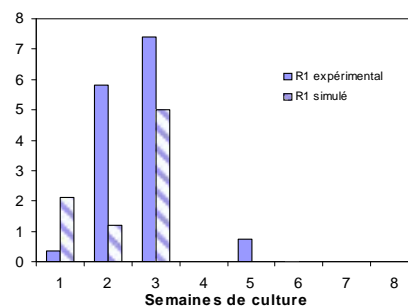
Le lessivage simulé, comme dans le cas des données observées, apparaît dans la première partie du cycle (figure 4). Il coïncide avec le phénomène de drainage qui peut être associé au niveau élevé des irrigations dans le même temps (données non présentées).

Le modèle situe les pertes en azote sous forme de nitrates, dans cette période, entre 8 et 10 kg/ha selon les placettes, et les mesures expérimentales entre 13 et 26 kg/ha. Ces différences entre valeurs simulées et observées résident dans l'appréciation des flux d'eau qui déterminent les niveaux de lessivage.

*In fine*, la concentration en nitrates de l'eau sortant du système varie de 48 à 96 mg/l d'après les simulations et de 110 à 202 mg/l d'après les résultats expérimentaux. Les écarts sont sensibles mais l'ordre de grandeur de l'ensemble des valeurs reste analogue.



**Figure 3 : Evolution du stock d'azote minéral (kg/ha) dans l'horizon 0-25 cm**  
 – valeurs simulées    ++ valeurs observées



**Figure 4 : Evolution des quantités d'azote lessivé (kg/ha) à 60 cm simulées par STICS et comparées aux valeurs observées**

## CONCLUSION

Cette première approche du modèle STICS, appliqué à une culture de laitue sous abri, présente des perspectives intéressantes sur le plan du diagnostic environnemental.

Concernant les variables de croissance de la culture, les résultats des simulations (taux de recouvrement, matière fraîche ou sèche et exportation d'azote) sont en accord avec des données observées.

Pour les variables sol (stocks d'eau et d'azote), les résultats obtenus sont à la fois :

- satisfaisants sur le plan de la cinétique comparée d'évolution des stocks d'eau et d'azote,
- insatisfaisants en l'état sur le plan des comparaisons des variables simulées et expérimentales.

Pour l'eau, des incertitudes concernant les valeurs d'humidité, réalisées par le laboratoire prestataire de service, ne sont pas totalement levées. Pour l'azote, la comparaison modèle- expérience doit être

relativisée au regard de la forte variabilité spatiale (CV entre 20 et 30 %) des stocks d'azote observés *in situ*.

Ceci dit, l'intérêt du modèle est évidente. Il offre une vision globale du système en intégrant les facteurs plante, sol, climat et techniques culturales et permet de tester plusieurs scénarios en intervenant judicieusement sur tel ou tel de ces facteurs. On mettra toutefois l'accent sur la nécessité d'avoir des données de très bonne qualité en vue des validations.

## Session 4

Mode d'utilisation du modèle et outils

Animateur : Frédéric Levraut

## Adaptation de STICS au lin graine : démarche et résultats

F. Flénet (Agro-Transfert Picardie) et P. Villon (Université de Technologie de Compiègne)

L'adaptation de STICS au lin graine est réalisée dans le cadre d'un programme de relance de cette culture en Picardie. L'objectif est d'utiliser STICS pour contribuer à l'amélioration des conduites culturales. L'adaptation du modèle consiste à identifier les paramètres qui sont propres à chaque espèce. Les équations du modèle sont conservées telles quelles. L'identification des paramètres est réalisée avec l'aide d'un chercheur en mathématique. Le document présente la démarche d'adaptation de STICS. Par ailleurs, les données observées et les simulations sont comparées.

### 1. Démarche d'adaptation de STICS

Le travail est réalisé sur la version 4 de STICS. Les options retenues sont détaillées dans le Tableau 1. L'adaptation concerne l'ensemble du fonctionnement de la culture, à l'exception de la levée et des seuils de stress hydrique (psisto et psiturg) en raison d'un manque de données expérimentales.

Tableau 1 Options de simulation

<b>Développement</b>	Température pilote = température de l'air
	Pas d'effet de la photopériode
	Pas d'effet retard du déficit hydrique
<b>Croissance en biomasse</b>	Seuils de température différents de ceux de l'indice foliaire
	Croissance juvénile par « efcrojuv »
	Interception du rayonnement par loi de BEER
<b>Production de graines</b>	Croissance déterminée
	Pas de contrainte thermique pour le remplissage
<b>Croissance racinaire</b>	Température pilote = température de culture
	Frein hydrique à la croissance des racines
	Croissance racinaire par profil type
<b>Consommation en eau</b>	Besoin en eau calculé par un coefficient cultural
	Pas d'interception de la pluie par le couvert
<b>Nutrition azotée</b>	Légumineuse : non
<b>Sénescence</b>	Non

Dans STICS, un grand nombre de paramètres sont communs à toutes les espèces. Ils peuvent donc être conservés pour le lin. En revanche, d'autres dépendent de l'espèce qui est simulée ; ils se trouvent dans le fichier plante. Il convient donc d'identifier leur valeur pour le lin. La liste des paramètres à identifier est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2 Liste des paramètres à identifier

Modules	Paramètres identifiés	Paramètres fixés arbitrairement
ABSORBN	adil, adilmax, bdil, bdilmax, INNmin, masecnmax, vmax2	kmabs1, kmabs2, vmax1
BEER	extin	
BIOMAER	efcrojuv, efcroirepro, efcroiveg, teopt	temax, temin
CALAI	adens, bdens, dlaimax, stamflax, stlevamf, stsenlan, tdmn	sbv
CROIRA	croirac, zpente, zprlim	proppfz, tcmax, tcmin
DEVELOP	(stamflax), stdrpmat, stlaxsen, (stlevamf), stlevdrp, (stsenlan), (tdmn)	tdmax
GRAIN	cgrain, cgrainv0, irmax, pgrainmaxi, viticarb	nbgain
KETP	kmax	
SOLNU	(extin)	

#### 1.1. Paramètres fixés arbitrairement

Pour simplifier le problème, certains paramètres sont fixés de façon arbitraire :

- Ceux qui sont identiques pour toutes les espèces (kmabs1, kmabs2, vmax1 et proppfz), même s'ils sont présents dans le fichier plante
- Les températures maximales pour la croissance et le développement. Les valeurs du blé, espèce de climat tempéré comme le lin, sont utilisées.
- Le nombre de jours pendant lesquels la croissance en biomasse détermine le nombre de graines (nbjgrain) est fixé à 20, car c'est le temps qui sépare deux mesures de biomasse dans les expérimentations.
- Le paramètre de limitation de la croissance des feuilles par la croissance en biomasse (sbv) est fixé à une valeur très élevée (950) pour que ce phénomène n'ait pas d'effet.

### 1.2. Identification des paramètres indépendamment du modèle

Les paramètres de courbe de dilution de l'azote (adil, adilmax, bdil et bdilmax), d'interception de la lumière (extin), de calcul du nombre de graines (cgrain et cgrainv0) et de l'indice de récolte (viticarb) sont identifiés indépendamment du modèle. Les mesures expérimentales nécessaires sont relativement faciles à obtenir : biomasse, teneur en azote, indice foliaire, interception du rayonnement, nombre et poids des graines. Par ailleurs, les équations (ou leur LOG) sont des droites. L'identification des paramètres est donc triviale.

Les paramètres « INNmin », « masecnmax », « irmax » et « pgrainmaxi » qui sont des variables couramment mesurées en expérimentation, sont les valeurs minimales ou maximales observées.

L'identification des paramètres de développement commence par la température de base (tdmin). La fonction coût est minimisée :  $J = (S_i - S_m)^2$  ;  $S_i$  est la somme de température pour atteindre un stade de développement pour l'observation  $n^o$ ,  $S_m$  est la moyenne des  $S_i$ . Une gamme de températures de base est testée. La valeur retenue est celle qui permet d'obtenir la valeur de J la plus basse. Les mêmes valeurs sont retenues pour les autres températures de base (tmin et temin). Ensuite, tous les stades de développement sont identifiés de façon visuelle, à l'exception du stade « amf ». La détermination visuelle est assistée par régression linéaire : « lan » est la somme de température pour laquelle la régression d'indice foliaire coupe l'axe des abscisses.

### 1.3. Identification des paramètres en utilisant les calculs du modèle

Les autres paramètres se trouvent dans des équations dont certaines variables ne sont pas mesurables, mais sont calculées par le modèle STICS. C'est par exemple le cas de la croissance de biomasse ou d'indice foliaire qui sont limitées par une variable de déficit hydrique (SWFAC et TURFAC). L'identification des paramètres est simplifiée par l'utilisation de données expérimentales sans déficit en azote ni en eau. Par ailleurs, il convient de respecter un ordre : les équations qui génèrent des variables utilisées par d'autres équations sont traitées en premier.

La première étape consiste à identifier les quatre paramètres de croissance foliaire : la somme de température entre la levée et le stade « amf » (stlevamf), « adens », « bdens » et « dlaimax ». L'identification des paramètres consiste à minimiser la fonction coût :  $J = (lai_{simulé} - lai_{mesuré})^2$  ; « lai » est l'indice foliaire. Le problème se résout en deux temps. Dans un premier temps, une gamme de valeurs du paramètre « stlevamf » est testée et celle qui minimise J est retenue. Dans un deuxième temps, les trois autres paramètres sont déterminés de façon analytique (les valeurs qui minimisent J peuvent être calculées). Cette procédure d'identification des paramètres est relativement complexe. Elle est réalisée par un chercheur en mathématique.

La deuxième étape identifie l'efficacité de la croissance en biomasse (efcroijuv, efcroiveg ou efcroirepro suivant le stade de développement) et la température optimale de croissance (teopt), en testant une gamme de valeurs. Toutes les combinaisons des deux paramètres sont évaluées. Les valeurs retenues sont celles qui minimisent la fonction coût (écart entre la biomasse simulée et mesurée).

Les quatre dernières étapes identifient un paramètre à la fois en testant une gamme de valeurs :

- étape 3 : identification de « kmax », en comparant le contenu du sol en eau simulé et mesuré
- étape 4 : identification de « croirac » en comparant la progression de l'absorption d'eau en profondeur simulée et mesurée
- étape 5 : identification de « zpenet » en comparant l'humidité du sol simulée et mesurée pour chaque horizon
- étape 6 : identification de « vmax2 » en comparant la quantité en azote des plantes simulée et mesurée

## 2. Adaptation de STICS au lin graine

L'adaptation de STICS est réalisée sur une variété de lin graine d'hiver (OLIVER) et deux variétés de lin graine de printemps (BAÏKAL et NIAGARA). Les données qui servent à l'identification des paramètres sont principalement issues de deux expérimentations en lin d'hiver et de trois expérimentations en lin de printemps. Ces données sont complétées par d'autres résultats expérimentaux dans certains cas. La comparaison entre les simulations et les mesures, présentée en Figure 1, concerne uniquement les deux principales expérimentations utilisées pour l'identification des paramètres de lin d'hiver. Les résultats observés en lin de printemps sont similaires.

Après estimation des paramètres, les simulations présentent une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. La Figure 1 le montre pour l'indice foliaire, la biomasse et l'absorption d'azote. Le principal problème concerne les simulations d'indice foliaire à très faible densité de peuplement à la fin de la période de croissance. Ce problème est spécifique au lin d'hiver. Ce type cultural peut mettre en place plus de 10 ramifications pendant l'hiver. A densité normale, à la reprise de végétation la plupart dégènèrent. En revanche, à très faible densité elles sont toutes conservées. En conséquence, l'indice foliaire progresse de façon très différente au printemps en fonction de la densité de peuplement. L'identification des paramètres ne permet pas de rendre compte des deux profils de croissance.

En fin de cycle, la verse est présente dans tous les traitements, à l'exception des plantes à très faible densité de peuplement dans une des expérimentations. Ce problème affecte le nombre de graines et leur remplissage. Ces données ne sont donc pas utilisées pour l'identification des paramètres de nombre de graines et d'indice de récolte. Seul le traitement non versé, qui est utilisé pour l'identification des paramètres, est représenté dans la Figure 1. Les simulations sous-estiment le nombre de graines et le rendement, car l'indice foliaire et la croissance en biomasse de ce couvert à très faible densité sont sous-estimés.

### 3. Validation de STICS-LIN

Le modèle est validé en comparant les simulations aux résultats d'expérimentations qui n'ont pas été utilisées pour l'identification des paramètres. La Figure 2 présente les résultats en lin d'hiver pour 3 expérimentations qui étudient la date et la densité de semis. Les résultats à très faible densité de semis ne sont pas représentés, car le modèle n'est actuellement pas capable de rendre compte de ces situations. La validation en lin de printemps est en cours. Elle n'est pas présentée dans ce document.

La biomasse est bien simulée par le modèle, malgré une sous-estimation de l'indice foliaire en fin de cycle. En effet, dans une des expérimentations la phase de réduction de l'indice foliaire est simulée plus tôt que ce qui est observé. En revanche, la quantité d'azote absorbée est surestimée dans deux expérimentations. En conséquence, les carences en azote qui sont observées dans ces expérimentations ne sont pas simulées par le modèle. Cet écart entre simulations et observations pourrait provenir de problèmes d'absorption d'azote non simulés par le modèle.

Dans les expérimentations, la verse est présente ainsi que des carences en azote. La verse n'est pas prise en compte par le modèle, et les carences en azote ne sont pas simulées. Le nombre de graines et le rendement simulés devraient donc être supérieurs aux observations. Les résultats obtenus sont les suivants :

- L'écart entre les traitements, important dans deux expérimentations sur trois, est mal simulé. Mais, l'écart observé en expérimentation est la conséquence d'une très forte variabilité et les différences ne sont pas significatives.
- Les valeurs sont surestimées par le modèle dans une expérimentation. En revanche, dans les deux autres les simulations sont proches des observations, alors qu'elles devraient être supérieures. Les faibles valeurs simulées sont le résultat d'un faible rayonnement pendant la période de calcul du nombre de graines. Dans la réalité, les plantes semblent moins sensibles.

### Conclusion

Une démarche simple d'adaptation de STICS à une nouvelle culture est proposée. Certains paramètres sont fixés par analogie avec d'autres espèces ou sont directement tirés de valeurs observées en expérimentation. Les autres paramètres nécessitent la mise en œuvre de méthodes d'identification des paramètres, mais celles-ci sont le plus souvent triviales. En particulier, lorsque l'identification est réalisée en testant plusieurs valeurs de paramètres, la mise en œuvre d'un algorithme d'optimisation n'est jamais nécessaire. En effet, seulement un à deux paramètres sont traités à la fois. Il est donc possible de tester toute la gamme des valeurs possibles. En plus d'être simple, cela permet d'être sûr d'obtenir la meilleure valeur des paramètres.

L'application de cette démarche au lin graine est satisfaisante. Ce résultat illustre l'aptitude de ce modèle à simuler une large gamme d'espèces. Une fois adapté, STICS reproduit assez fidèlement le comportement du lin, à l'exception des très faibles densités de peuplement du type hiver. STICS ne simule pas la compétition entre ramifications. Il est probable que ce modèle ne soit pas capable de rendre compte avec le même jeu de paramètres des densités normales, qui présentent une forte dégénérescence de ramifications, et des très faibles densités dont toutes les ramifications se développent. Par

ailleurs, le calcul du nombre de graines à partir de la biomasse produite 20 jours avant le début du remplissage doit être amélioré. Dans la réalité, les plantes semblent capables de compenser une période de faible rayonnement avant le début de remplissage des graines. La validation de STICS-LIN doit être complétée, en particulier en lin de printemps. Mais, les premiers résultats laissent espérer que le modèle pourrait rapidement être utilisé comme aide au diagnostic, moyennant quelques améliorations.

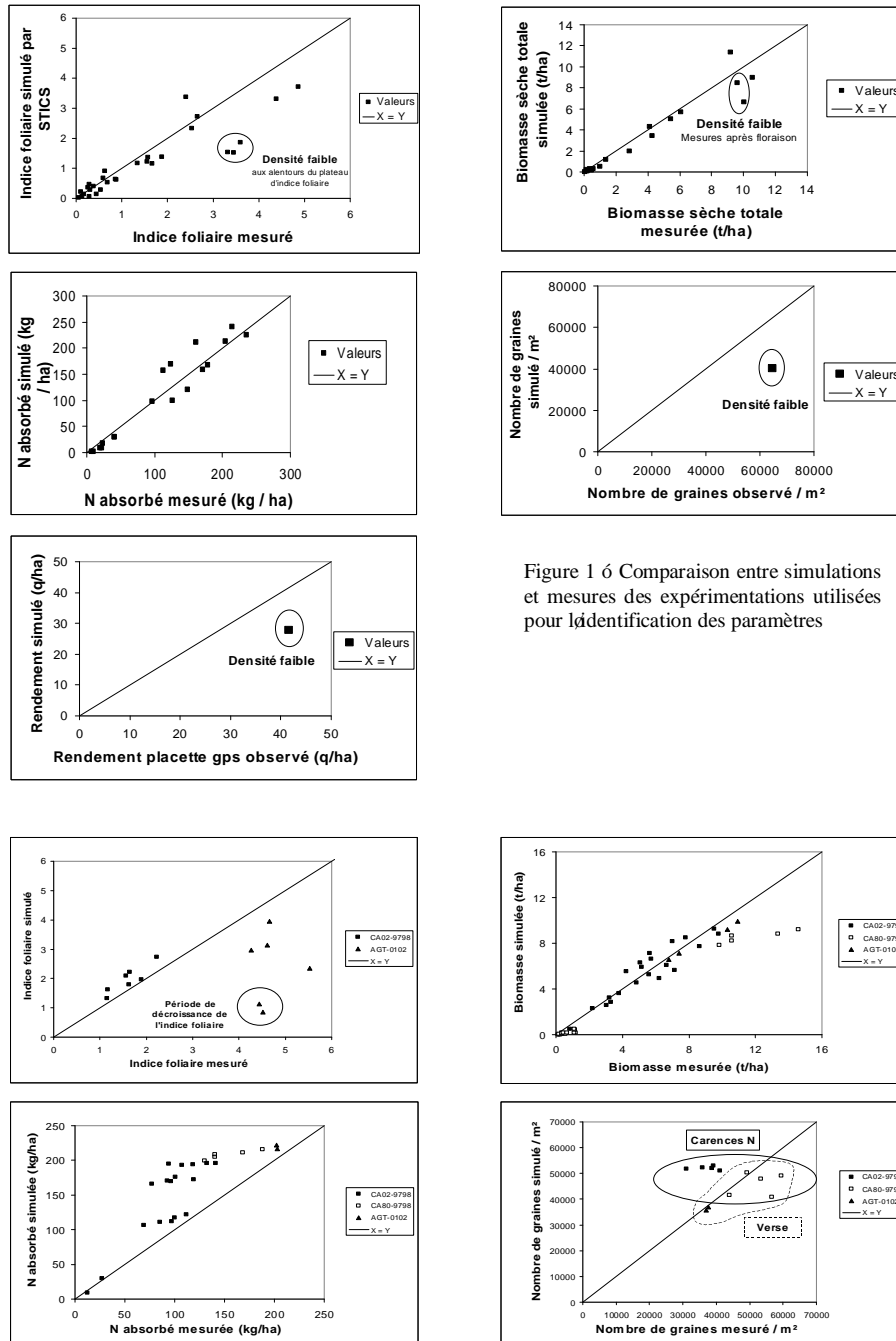


Figure 1 6 Comparaison entre simulations et mesures des expérimentations utilisées pour l'identification des paramètres

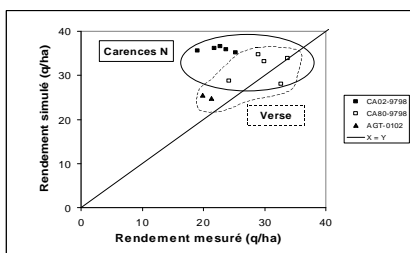


Figure 2.6 Comparaison entre simulations et mesures des expérimentations indépendantes de l'identification des paramètres



## Tests du modèle STICS vigne

Jean-Pierre Gaudillère, Nadine Brisson

ECAV, Bordeaux, Climat Sol et Environnement, Avignon

Le modèle STICS est par nature intégrateur. Il prend en compte les interactions entre les facteurs du milieu et la réponse de la vigne en calculant des indices de stress hydriques et azotés qui agissent sur le développement des organes et leur fonctionnement trophique. Cette caractéristique en fait son intérêt. Cependant en phase de validation ces interactions peuvent masquer des dysfonctionnements du modèle. Il est donc nécessaire, dans une première étape, de découpler un certain nombre de facteurs en forçant le modèle. Cette option existe pour l'indice foliaire. Nous avons étendu cette stratégie en imposant la charge en fruits, et la quantité de rayonnement intercepté. Ces options sont en fait couramment utilisées en viticulture par la taille et le palissage du feuillage et l'éclaircissage des fruits.

L'objectif est de tester les modules stress hydrique et stress azoté et les règles d'allocation entre végétation et fruits.

Le forçage du modèle a été réalisé par l'intervention de tailles en vert et le réglage des hauteurs de feuillage (dans le fichier des techniques). La charge en fruits a été ajustée en agissant sur les paramètres de mise en place des fruits (nombre de baies nouées par degré jour). Le modèle a été appliqué à 3 types de sols (différence de réserve utile en eau) et 3 années climatiques.

### 1) Mise en place des fruits :

Le nombre de fruits noués est défini par la température au moment de la floraison. D'une part le modèle sous-estime le nombre de baies nouées et d'autre part il est extrêmement sensible aux conditions de l'année. La mise en place du potentiel de récolte de la vigne doit être adapté. Le nombre de fleurs émises est déterminé par les événements de l'année précédente et le taux de nouaison dépend de conditions climatiques limites, froid ou pluie au moment de la floraison que par à des facteurs cinétiques, nombre de fleurs fécondées par degré jour.

### 2) La répartition de la matière sèche :

La biomasse produite n'est pas corrélée à l'interception du rayonnement imposée par le mode de conduite (hauteur de palissage et densité de plantation).

La hauteur de palissage a des conséquences sur le nombre de baies. Il faudra expliquer cette interaction inattendue.

L'augmentation du nombre des baies est bien associée à des baies plus petites. Cependant un excès de carbone est observé à la récolte sous la forme de réserves aussi abondantes que les fruits. Une partie de cette matière sèche aurait permis d'atteindre des poids moyens de baies plus réalistes. Le module d'allocation vers les baies doit être optimisé.

### 3) Le bilan hydrique :

Le modèle prévoit une consommation d'eau facilement satisfaite par la réserve en eau du sol et le régime des pluies pendant la saison. Ceci n'est pas observé au vignoble à Bordeaux. Le stress hydrique est un événement régulier sur les bons sols viticoles. L'année 1998 avec un mois d'août chaud et sec a conduit à des sécheresses marquées. Une surestimation de la réserve en eau du sol est possible.

### 4) La contrainte azotée :

Le modèle prévoit une contrainte azotée de la floraison jusqu'à la récolte. Ce serait le principal facteur limitant du développement de la vigne dans nos conditions.

## Simulation et analyse de scénarios de modes de conduite de cultures intermédiaires pièges à nitrate avec le modèle STICS.

Eric JUSTES<sup>1</sup>, Fruck DORSAINVIL<sup>2</sup>, Marc ALEXANDRE<sup>1</sup> et Pascal THIEBEAU<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> INRA, Agronomie Toulouse ; <sup>2</sup> Univ. d'Haïti Fac. d'Agronomie; <sup>3</sup> INRA Agronomie, Reims

### Introduction

Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) sont utilisées en interculture (période entre deux cultures principales) pour réduire les pertes de nitrate par lixiviation durant la période de drainage (principalement automne hiver). De nombreuses études, réalisées en cases lysimètres ou au champ depuis une vingtaine d'années, ont démontré leur efficacité pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage qui s'écoule hors de la portée des racines (Martinez et Guiraud, 1990 ; Chapot, 1995 ; Machet *et al.*, 1997). Toutefois, les effets sur la culture suivante sont parfois contradictoires notamment concernant la consommation en eau et surtout la disponibilité en azote. Ainsi, à court terme, l'implantation d'une CIPAN ne permet pas toujours de restituer des quantités significatives d'azote pour la culture suivante par rapport à sol nu et peut même conduire à un effet de « pre-emptive competition » ou « compétition par préemption d'azote » comme défini par Thorup-Kristensen (1994) ayant pour conséquence une diminution de la disponibilité en azote pour la culture suivante après CIPAN en comparaison avec un sol nu ; ainsi, pour le même potentiel de rendement la dose d'engrais calculée est plus élevée après CIPAN. Les conséquences de l'introduction des CIPAN sont *a priori* très différentes en fonction du pédoclimat et du système de culture. Nous avons donc réalisé des simulations de scénarios en utilisant le modèle STICS 5 (Brisson *et al.*, 1998 ; 2002 ; 2003), adapté pour la moutarde et le RGI (Dorsainvil, 2002 ; Alexandre, 2002). Préalablement, les paramètres du module de décomposition du modèle STICS, initialement déterminés pour des résidus de récolte « matures » (pailles, racines), ont dû être adaptés pour les résidus « verts » de CIPAN car ils se décomposent plus rapidement pour un même rapport C/N (Justes *et al.*, 2001).

L'utilisation du modèle STICS nous a permis d'explorer de nombreuses situations combinant états initiaux, itinéraires techniques et pédoclimats, dont l'analyse des résultats peut permettre de proposer des règles de conduite des CIPAN « optimisées ».

### Méthodes

#### • Questions analysées et méthodes choisies

Ayant le souci de ne pas réaliser des simulations « tout azimut » et d'apporter une contribution « méthodologique », nous avons choisi de répondre à quelques questions précises, identifiées comme « importantes » après enquête auprès des ingénieurs du développement. Les questions traitées ont été les suivantes (Dorsainvil, 2002) :

3. Quelle est l'influence de la date de levée sur le potentiel d'absorption d'azote des CIPAN ?
4. Quel est l'effet des CIPAN sur le bilan d'eau ? *Et plus précisément :*
  - h) Quel est le risque qu'une moutarde maintenue en place pendant la période été-automne limite la recharge hydrique de la réserve du sol en hiver en climat peu pluvieux ?
  - i) Quel est le risque d'un dessèchement du sol en surface au début du printemps, lié à la présence d'un ray-grass jusqu'en mars-avril ?
5. Quelle est l'influence de la date de retournement des CIPAN sur les fuites de nitrate et la fertilisation azotée de la culture suivante ?
6. Quelle est l'efficacité d'une CIPAN pour recycler des produits organiques contenant de l'azote épandus en été ?

Ensuite il a fallu bâtir le plan d'expérience numérique (plan de simulations avec STICS) et le plan d'analyse des sorties du modèle, ce qui demande une réflexion préalable tout aussi cruciale, voire davantage, que lorsqu'on réalise une expérimentation « classique ».

Les simulations ont été réalisées pour chaque année de la série climatique des 25 ou 30 dernières années pour les trois premières questions et pour la dernière décennie pour la question 4, pour laquelle la phase semis-levée a été simulée avec le modèle SIMPLE (Dürr *et al.*, 2001).

Les résultats des simulations ont été analysés en terme de médiane et 1<sup>er</sup> et 4<sup>ème</sup> quintiles (Dorsainvil, 2002) ou de 1<sup>er</sup> et 9<sup>ème</sup> déciles (Alexandre, 2002) de la série climatique. Les variables de sorties analysées dépendent de la question traitées.

Les fichiers de sortie (rapport.sti) ont été traités de façon semi-automatique par des macros Excel et l'outil DTBox, aimablement fourni par Xavier LEBRIS (ITCF), afin de réaliser les calculs statistiques et les graphiques (Alexandre, 2002).

- **Un exemple de scénario simulé : évaluation de l'effet des CIPAN sur le bilan d'azote**

Pour répondre à la question 3 traitant de l'influence de la date de retournement des CIPAN sur les fuites de nitrate et la fertilisation azotée de la culture suivante, nous avons choisi de travailler dans 2 pédoclimats très contrastés (Châlons en Champagne et Quimper) pour lesquels 3 profondeurs de sol (60, 90 et 120 cm) et 2 états initiaux d'azote minéral (faible et fort reliquat récolte) ont été pris en compte, considérant qu'ils constituaient les principaux facteurs de variation de la réponse. Nous avons testé 4 ou 5 dates de destruction balayant une large gamme, mais plutôt précoce (01/10, 01/11, 01/12, 01/01 pour la moutarde à Châlons en Ch. et en plus le 15/02 pour le RGI à Quimper). La date de levée a été imposée au 15 août (date considérée comme optimale dans ces pédoclimats après les simulations réalisées pour répondre à la question 1). Chaque situation (itinéraire technique / pédoclimat) avec CIPAN a été comparée avec une interculture sans CIPAN (sol nu avec enfouissement des résidus de récolte de la culture précédente).

Les variables de sorties analysées ont été : la concentration en nitrate de l'eau drainée (simulée au 25/04 correspondant généralement à la fin du drainage), la quantité d'azote minéral dans le sol (simulée au 25/04 et 15/07) qui reflète la disponibilité pour la culture suivante (au semis et l'effet court terme de la CIPAN). Pour comprendre le fonctionnement du « système », nous avons également analysé la quantité d'azote nitrique lixiviée, la dynamique de minéralisation des résidus de CIPAN et la contribution de l'azote libéré à la lixiviation du nitrate lors d'interculture occurrente (même hiver).

### **Un exemple de résultats : Effet de la date d'incorporation de la CIPAN sur la concentration en nitrate de l'eau de drainage**

Tous les résultats des simulations indiquent que l'implantation d'une CIPAN (moutarde ou RGI) est efficace pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage (réduction de 20 à 80% de la teneur en nitrate) même lorsque la date de destruction est très précoce (01/10). Toutefois, le taux de réduction des fuites de nitrate augmente quand la date d'incorporation est retardée et que le sol contient initialement un reliquat élevé. Les CIPAN sont également d'autant plus efficaces que le sol est superficiel. Enfin, il n'y a généralement pas d'intérêt à détruire trop tard la CIPAN car la réduction de la teneur en nitrate devient faible pour des dates de destruction postérieures au 15/12 dans le cas de la moutarde et au 15/01 avec du RGI (même en climat très pluvieux).

Concernant la contribution de la minéralisation des résidus de CIPAN aux pertes de nitrate, les résultats montrent que c'est seulement en cas de retournement très précoce (01/10 et 01/11) et en climat très pluvieux (cas de Quimper où le drainage médian est de 550 mm/an) ou en sol très

superficiel ( $\leq 60$  cm) qu'une partie significative de l'azote minéralisé issue de la CIPAN est lixiviée. Toutefois et comme nous l'avons déjà indiqué, la CIPAN est toujours bénéfique pour réduire la concentration en nitrate, indiquant que même pour des sols où les labours d'automne sont pratiqués il y a un intérêt environnemental à implanter des CIPAN.

## Conclusions

### • Sur le plan agronomique et conséquences pratiques

Toutes les simulations réalisées dans les quelques pédoclimats testés confirment que l'efficacité des CIPAN est incontestable pour réduire les fuites de nitrate et la concentration de l'eau de drainage ; ce qui est intéressant de souligner c'est que les taux de réduction des fuites de nitrate simulés sont en bon accord avec tous les travaux déjà publiés sur la base de multiples expérimentations. C'est un élément à mettre au crédit de la qualité de robustesse recherchée par les concepteurs du modèle STICS.

Nous avons également montré qu'il n'y a pas intérêt à détruire trop tard la CIPAN car sinon la disponibilité en azote pour la culture suivante sera réduite, et ce d'autant plus que le sol est profond ou le climat hivernal peu pluvieux ; ce qui est une conclusion importante pour la gestion des CIPAN. Les scénarios de simulation ont été volontairement choisis pour représenter des situations « contrastés » mais cependant élaborés dans le but de répondre à une question précise et de comprendre les dynamiques concernant l'eau et l'azote en interculture avec et sans CIPAN. La réponse apportée est relative à ces situations même si certains résultats ont une portée générale du fait des facteurs étudiés (gamme de profondeur de sol, série climatique de 30 années, forte différence d'état initial). Ce travail confirme néanmoins nos suppositions présumant que l'interaction entre les facteurs testés est très complexe ; cela renforce donc l'idée qu'il est préférable de réaliser une simulation par situation « type » pour prétendre optimiser le mode de conduite des CIPAN (date de semis, date d'incorporation, espèce,  $\dots$ ) selon le système de culture et surtout de la situation pédoclimatique. Ceci est d'autant plus vrai que l'on cherche à simultanément réduire les pertes d'azote, ne pas trop consommer d'eau et restituer au maximum l'azote absorbé par la CIPAN pour la culture suivante. Une vraie optimisation multicritères, nécessiterai également un couplage du modèle STICS avec un algorithme de calcul de la solution optimale, comme c'est le cas avec le modèle MODERATO pour les stratégies d'irrigation du maïs (Bergez *et al.*, 2001).

### • Sur le plan « méthodologique »

Il est évident que la rigueur est le maître mot lorsqu'on se lance dans un travail d'expérimentation numérique telle que la simulation de scénarios.

Nous avons également été confrontés à des problèmes de deux ordres. D'abord de renseignement des données sol et notamment pour la valeur du paramètre  $Q_0$ , qui s'est avérée déterminante pour la simulation de la consommation en eau des CIPAN et du drainage ; il nous semble nécessaire de réfléchir à une méthode d'estimation réaliste de ce paramètre. Ensuite, le traitement des données demande une réflexion statistique plus élaborée, notamment pour déterminer la meilleure façon de comparer 2 situations (avec et sans CIPAN) sur une série climatique : par exemple, est-il préférable de d'analyser la médiane des différences calculées année par année ou de comparer la différence des médianes ?

### • Sur le plan informatique

Nous avons bénéficié de l'aide précieuse de Dominique Ripoché (INRA Avignon) et de Xavier Lebris (ITCF), qu'ils en soient remerciés. Mais il serait très utile de pouvoir bénéficier de procédures « standard » permettant d'une part d'automatiser les simulations (un petit espoir est né du côté de

Toulouse avec la BAO développée par MH Charron et D Wallach) et, d'autre part, de « récupérer » et traiter les résultats. En effet, la création et le débogage des macros sous Excel n'est pas toujours de tout repos, et surtout, cela limiterai probablement les risques d'erreurs dans les multiples fichiers à manipuler (?) í

## Références Bibliographiques

- Alexandre M., 2002. Evaluation par simulation avec le modèle STICS des effets environnemental et agronomique des cultures intermédiaires pièges à nitrates. *Mémoire de DAA*, INP-ENSAT, 69 p.
- Bergez JE., Debaeke P., Deumier JM., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D., 2001. MODERATO : an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling*, 137, 43-60
- 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., Mchet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998. STICS : a generic model for the simulation of crop 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 K., 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 crop 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 G., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-322.
- Chapot J.Y., 1995. Devenir de l'azote d'une culture intermédiaire de moutarde marquée à l'azote 15. Etude sur lysimètres pendant sept années. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 81, 145-162.
- 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-PG, 124 p.
- Dürr C., Aubertot J. N., Richard G., Dubrulle P., Duval Y., Boiffin J., 2001. SIMPLE, a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 414-423.
- Justes E., Nicolardot B., Mary B., 2001. C and N mineralisation of catch crop residues: measurements and evaluation of STICS model. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Nitrogen Workshop*, 9-12 September 2001, Reims, France, INRA, 113-114.
- Mchet J.M., Laurent F., Chapot J.Y., Dore T., Dulout A., 1997. Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères. In : « *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes* » : Colloque de Reims 19 et 20 nov. 1997. INRA-Éditions, Ed. Lemaire G. et Nicolardot B., (Les colloques de l'INRA), 83, 271-288.
- Martinez J., Guiraud G., 1990. A lysimeter study of the effects of a ryegrass catch crop, during a winter wheat/maze rotation, on nitrate leaching and on the following crop. *Journal of Soil Science*, 41, 5-16.
- Thorup-Kristensen K., 1994. The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops. *Fertilizer Research*, 37, 227-234.

## "2002 : année de restrictions pour l'irrigation du maïs en Poitou-Charentes. Quels impacts à l'échelle du bassin ó versant ?

Des réponses avec STICS ó COGITO.

F. LEVRAULT\*, C. FERRANE\*\*, J-M. CHAZALON\*\*

### Contexte

En Poitou-Charentes, l'été 2002 a été marqué par de sévères restrictions d'irrigation : les niveaux des nappes et les débits des rivières, excessivement bas à la sortie de l'hiver du fait de pluies très faibles (cf graphe 1), ont franchi les seuils d'alerte dès le début de la campagne d'irrigation entraînant la mise en place de restrictions voire d'interdictions d'irrigation sur de nombreux bassins ó versants.

Figure 1 : précipitations du 01 octobre au 31 mars  
Angoulême 1967 - 2002

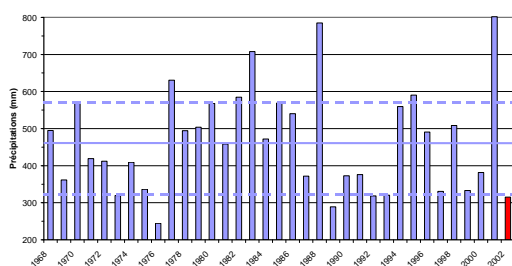
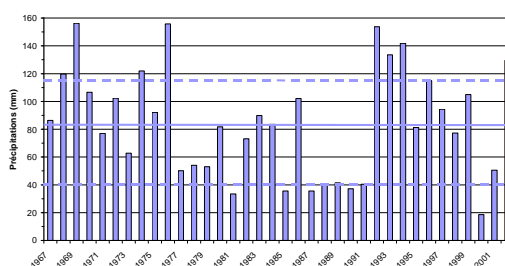


Figure 2 : précipitations du 01 août au 15 septembre  
Angoulême 1967 - 2002



Malheureusement, l'absence de références expérimentales (comparaison "rendement à l'ETM ó rendement avec restriction") n'a pas permis de chiffrer l'effet de ces restrictions sur la production du maïs, principale culture irriguée de la région (90 % des surfaces irriguées). On peut simplement avancer que les fortes précipitations observées après le 1<sup>er</sup> août 2002 ont minimisé cet effet (cf graphe 2). En outre, on ne dispose pas d'estimations des quantités d'eau que les irrigants n'ont pas prélevées en application des restrictions. Les références manquent donc pour l'établissement d'un bilan économique et environnemental de cette crise.

### Objectif

On veut estimer à l'échelle du bassin versant et au moyen du simulateur STICS ó COGITO (calé et validé en Poitou-Charentes) l'impact des restrictions d'irrigation mises en place en 2002 :

- au niveau de la production de maïs pour chiffrer le coût supporté collectivement par les irrigants en appliquant les restrictions ;
- au niveau des prélèvements d'eau pour établir un ratio économique et environnemental.

Puis on veut évaluer les pertes de production qui auraient été subies si les précipitations du mois d'août 2002 avaient été moins importantes (exemple : moyenne trentenaire).

L'étude a été réalisée par les conseillers irrigation des quatre Chambres d'Agriculture de Poitou-Charentes dans le cadre du réseau STICS ó COGITO. On présente ici les résultats obtenus en Charente dont les 20 bassins en gestion volumétrique ont subi des restrictions en 2002.

### Méthode de calcul

Le travail est mené sur les bassins de la Bonnière et du Né (cf tab 1) et se déroule en six étapes.

Tableau 1 : principales caractéristiques des bassins étudiés.

	Surface maïs irrigué (ha)	Nombre d'irrigants	Nb semaines restrictions	
			Limitations	Interdictions
BONNIEURE	280	18	10	1
NE	1110	108	4	7

### 1) RECONSTITUTION DE L'HISTORIQUE DES ALERTES

BASSIN	Date	15-juin	30-juin	10-juil	20-juil	31-juil	10-août	20-août	31-août	15-sept
BASSIN DE LA BONNIEURE.	Vol autorisé (m3/ha)	300	400	400	400	400	400	300	150	
	Niveau d'alerte	Pas d'alerte	Alerte 2	Alerte 2	Alerte 3	Alerte 3	Alerte 3	Alerte 2	Alerte 3	
	Coef d'attribution (%)	100	70	70	50	50	50	50	50	
	Vol attribué (m3/ha)	300	280	280	200	200	200	150	75	
BASSIN DU NE.	Vol autorisé (m3/ha)	150	350	450	450	450	400	350	150	
	Niveau d'alerte	Pas d'alerte	Alerte 2	Alerte 2	Alerte 2	Alerte 4	Alerte 4	Alerte 4	Alerte 4	
	Coef d'attribution (%)	100	70	70	70	0	0	0	0	
	Vol attribué (m3/ha)	150	245	315	315	0	0	0	0	

2) PRISE EN COMPTE DE LA SURFACE DE MAÏS IRRIGUE PAR BASSIN afin de globaliser les résultats de simulation à l'échelle de chaque bassin versant : BASSIN DE LA BONNIEURE : 280 ha - BASSIN DU NE : 1110 ha.

3) ESTIMATION DE LA PROPORTION DES TYPES DE SOL. Faute d'estimation fiable, on travaille par type de sol. C'est le cas pour le bassin du Né dont les calculs sont réalisés d'abord pour une Champagne de 75 mm de RU puis de 125 mm RU, les résultats étant comparés ensuite.

BASSIN DE LA BONNIEURE	BASSIN DU NE
Groie 50 mm RU : 55 %	Champagne 75 mm RU : 100 % puis
Sable sur granite 75 mm RU : 20 %	Champagne 125 mm RU : 100 %
Terre rouge 100 mm RU : 25 %	

4) SIMULATION STICS - COGITO POUR CHAQUE TYPE DE SOL DE L'IRRIGATION EN CONDITIONS HYDRIQUES NON LIMITANTES (ETM).

5) SIMULATION POUR CHAQUE TYPE DE SOL DE L'IRRIGATION EN GESTION VOLUMETRIQUE SANS ALERTE. On compare, par période de gestion (15 juin à 30 juin, etc.) les volumes d'eau utilisés à l'ETM, aux volumes autorisés par la gestion volumétrique hors alertes. S'il y a dépassement, on écrete le dernier apport. On obtient ainsi pour chaque sol un deuxième calendrier correspondant à la gestion volumétrique sans les alertes de 2002. On précise ainsi si la gestion volumétrique sans alerte a été limitante.

6) SIMULATION POUR CHAQUE TYPE DE SOL DE L'IRRIGATION EN GESTION VOLUMETRIQUE AVEC ALERTES. Pour chaque type de sol, on déduit du calendrier précédent un troisième calendrier d'irrigation qui tient compte des restrictions mises en place sur les deux bassins étudiés. Les coefficients d'attribution liés aux différents niveaux d'alerte sont :

Alerte 1 : 85 % des volumes attribués ;	Alerte 3 : 50 % des volumes attribués ;
<b>Alerte 2 : 70 % des volumes attribués ;</b>	<b>Alerte 4 : interdiction d'irriguer.</b>

### Résultats

**Impact de la gestion volumétrique sans alertes.** Dans les deux bassins les volumes d'irrigation et les rendements calculés à l'ETM sont proches de ceux en gestion volumétrique sans alerte, ce qui indique que la gestion volumétrique aurait donné accès au potentiel en 2002, alertes mises à part. On constate par contre une différence de rendement entre les deux bassins (110 pour la Bonnieure et 138 pour le Né (cf tab 2) qui découle des précocités plus tardives et des sommes de températures plus fortes pour le bassin du Né, plus méridional.

BASSIN DE LA BONNIEURE

BASSIN DU NE

Tableau 2 : production de maïs grain et prélèvements d'eau en gestion volumétrique sans alerte.

	Gestion vol				Gestion vol			
	Rdt (Q/ha)	Prod (Q)	Vol (m3/ha)	Prél (m3)	Rdt (Q/ha)	Prod (Q)	Vol (m3/ha)	Prél (m3)
Groie	111	17 094	1650	254 100	137	152 070	1700	1 887 000
50 mm RU								
Sable / Granite	109	6 104	1650	92 400	138	153 180	1500	1 665 000
75 mm RU								
Terre Rouge	110	7 700	1350	94 500				
100 mm RU								
Bassin		30 898		441 000				

En gestion volumétrique sans alerte chaque quintal produit aurait conduit à prélever 14,3 m3 d'eau (441 000 / 30 898) dans le bassin de la Bonniere et entre 10,9 (1 665 000 / 153 180) et 12,4 m3 (1 887 000 / 152 070) dans le bassin du Né. Cette différence d'efficacité en conditions non limitantes (voir plus haut) découle des plus forts potentiels du bassin du Né et de la part plus élevée des sols à faible RU dans le bassin de la Bonniere. Le m3 d'eau prélevé n'a donc pas nécessairement la même valeur économique d'un bassin à l'autre.

Ce ratio, qui ne prend en compte que l'eau d'irrigation constitue un bilan économique et environnemental des prélèvements d'eau à l'échelle d'un bassin. Il pourrait être calculé sur une longue série climatique (30 ans) de façon à en observer la gamme de variation, liée essentiellement aux différences de précipitations d'une année à l'autre.

**Impact des restrictions liées aux alertes.** Dans le bassin de la Bonniere (cf tab 3) les alertes ont conduit les irrigants à réduire leurs prélèvements de 107 660 m3 (-24 %) ce qui a entamé leur production de 3500 quintaux (-11%), soit en moyenne de 12,5 Q/ha (3500 / 280).

	Pertes absolues		Pertes relatives	
	Prod (Q)	Prél (m3)	Prod (Q)	Prél (m3)
Gr 50 mm	2 618	58 520	0,15	0,23
S/G 75 mm	112	21 840	0,02	0,24
TR 100 mm	770	27 300	0,10	0,29
Bassin	3 500	107 660	0,11	0,24

Tableau 3 : Pertes de production et de prélèvements dans le bassin de la Bonniere

Dans le bassin du Né (cf tab 4) les alertes ont amené les irrigants à diminuer leurs prélèvements de 810 300 à 856 800 m3 (-49 à 646 %) selon le type de sol ce qui a affecté leur production de 15 540 (-10 %) à 18 870 (-12 %) quintaux soit 14,0 (15 540 / 1110) à 17,0 (18 870 / 1110) Q/ha.

	Pertes absolues		Pertes relatives	
	Prod (Q)	Prél (m3)	Prod (Q)	Prél (m3)
Ch 75 mm	18 870	865 800	0,12	0,46
Ch 100 mm	15 540	810 300	0,10	0,49

Tableau 4 : Pertes de production et de prélèvements dans le bassin du Né

Dans les deux bassins, la perte relative des prélèvements plus forte que pour la production traduit la plus faible efficacité de l'eau à proximité des rendements potentiels. Les pertes de rendement, plus fortes pour le Né, découlent de restrictions plus sévères : interdiction d'irriguer dès le 1<sup>er</sup> août.

Sur la base d'un maïs à 10 t le quintal, la perte financière s'établit à 35 000 t pour la Bonniere et entre 155 400 et 188 700 t pour le Né (cf tab 5). Le m3 d'eau non prélevé a coûté entre 0,19 et 0,33 t, à comparer au coût de stockage d'un m3 d'eau dans une réserve : environ 2 t. Finalement, chaque quintal perdu par les producteurs a permis d'éviter le prélèvement de 31 à 52 m3 d'eau.

	BASSIN DE LA BONNIEURE			BASSIN DU NÉ		
	Prod (t)	M3 non prélevé / Q perdu	M3 n prélevé (t)	Prod (t)	M3 non prélevé / Q perdu	M3 n prélevé (t)
Bassin	35000	31	0,33	188 700	46	0,22
				155 400	52	0,19

Tableau 5 : conséquences économiques des restrictions d'irrigation.



### Impact d'un mois d'août moins arrosé en cas d'interdiction d'irriguer au 1<sup>er</sup> août.

Les conséquences des restrictions d'irrigation ont été fortement tamponnées par des précipitations importantes après le 1<sup>er</sup> août : 130 mm du 1<sup>er</sup> août au 15 septembre soit la sixième valeur depuis 1967 (cf fig 2). On s'interroge sur ce qui serait advenu si le mois d'août avait été moins arrosé. Cette question peut être traitée par la simulation. On ne traite ici que du cas des Champagnes de 100 mm dans le bassin du Né.

Pour ce faire, on utilise le climat de l'année 2002 jusqu'au 31 juillet inclus et celui d'autres années à partir du 1<sup>er</sup> août. L'effet de six années est testé, trois pour lesquelles les pluies du 1<sup>er</sup> août au 15 septembre sont proches de la moyenne trentenaire (1983, 1984 et 1993) et trois pour lesquelles ces pluies sont proches du 1<sup>er</sup> quintile trentenaire (1981, 1989 et 2000) comme le montre la figure 2. L'effet des autres variables climatiques n'est pas étudié ici. On rappelle que le rendement obtenu dans le bassin du Né sur Champagne de 100 mm de RU avec le climat et les alertes de 2002 est de 124 Q/ha.

On constate (cf tab 6) qu'avec une fin de cycle moyennement arrosée (années 1983, 1984 et 1993) le rendement moyen est de 111 Q/ha (- 13 Q/ha), tandis qu'avec une fin de cycle peu arrosée (années 1981, 1989 et 2000) le rendement moyen chute à 98 Q/ha (-26 Q/ha). Sur des sols moins profonds l'effet des restrictions aurait été évidemment encore plus marqué.

Climat avant le 01 / 08	Climat après le 01/08	Rdt (Q/ha)	ETR / ETM	Climat avant le 01 / 08	Climat après le 01/08	Rdt (Q/ha)	ETR / ETM
2002	1 983	110	0,82	2002	1 981	100	0,74
2002	1 984	120	0,80	2002	1 989	103	0,72
2002	1 993	102	0,76	2002	2 000	90	0,71
Moyennes		111	0,79	Moyennes		98	0,72

Tableau 6 : effet sur le rendement en grain du maïs et le rapport ETR/ETM de fins de cycles culturaux moyennement (années 1983, 1984 et 1993) ou peu (années 1981, 1989 et 2000) arrosées. Bassin du Né. Champagne 100 mm RU.

### Conclusion

Cette analyse par simulation des effets d'une crise à l'échelle d'un bassin-versant est nouvelle pour les conseillers irrigation de Poitou-Charentes. Elle fournit des éléments à la profession agricole pour cerner les coûts économiques et environnementaux collectifs liés à la gestion de la ressource en eau et notamment à la mise en place de mesures de restriction, comme en 2002.

La valeur économique du m<sup>3</sup> d'eau prélevé est jugée ici au travers de la perte de rendement occasionnée en l'absence de prélèvement. En raison des différences de sols et de climat, cette valeur économique s'avère différente d'un bassin à l'autre au sein d'un même département.

Les erreurs d'estimation de production de maïs grain et de prélèvement d'eau faites à cette échelle sont difficiles à préciser. Elles ont pour causes premières, la précision du modèle, l'erreur d'appréciation des différents types de sols et la représentation très simplifiée du fonctionnement d'une exploitation irriguée.

Dans cette étude les effets des alertes mises en place en 2002 sont analysés a posteriori. Cependant, lorsqu'une situation de crise se présente en cours de campagne, une estimation a priori par simulation des conséquences possibles de cette crise est réalisable. Elle nécessite une approche fréquentielle du climat à venir compte tenu de l'impossibilité d'une prévision sur des délais aussi longs (ici un mois et demie).

\* Frédéric LEVRAULT ó Agrotransfert Poitou-Charentes ó INRA Les Verrines 86600 LUSIGNAN

\*\* Claudine FERRANE ó Chambre Départementale d'Agriculture de Charente ó BP 1364 16016 ANGOULÊME cedex

\*\* Jean-Michel CHAZALON ó Chambre Départementale d'Agriculture de Charente ó BP 1364 16016 ANGOULÊME cedex

Réunion des utilisateurs de STICS, Arles 23, 24 Janvier 2003

## **Intégration de données satellitales multitemporelles pour le forçage de STICS. Application à la culture du maïs dans le cadre de l'agriculture de précision.**

Jean-Ph Denux  
[jpdenux@esa-purpan.fr](mailto:jpdenux@esa-purpan.fr)

Laboratoire de Télédétection et de Cartographie Numérique  
E.S.A. PURPAN  
75 voie du TOEC - 31076 TOULOUSE cedex 3  
tel : 05 61 15 30 82 fax 05 61 15 30 60  
Web site : <http://www.esa-purpan.fr/lcn/accueil.htm>

Mots clé : Télédétection, modèle de fonctionnement des cultures, STICS, agriculture de précision.

Les travaux menés dans le cadre de l'agriculture de précision ont pour objectif d'aider les agriculteurs à améliorer leur prise de décision. La démarche de l'E.S.A.Purpan est construite sur l'utilisation de systèmes d'information géographique qui sert d'une part à organiser les paramètres d'entrée pour la modélisation et d'autre part à analyser spatialement les résultats. L'objectif du travail présenté ici est de montrer l'intérêt de la télédétection satellitale pour l'agriculture de précision. Les informations issues des images satellitales sont intégrées au modèle STICS. Il s'agit dans un premier temps de comprendre le comportement des cultures, à terme cela pourra nous amener à élaborer des scénarii pour l'agriculteur.

Sur notre site d'étude au sud-ouest de Toulouse, nous disposons de sept images SPOT XS pendant la période de culture du maïs, soit environ une image par mois d'avril à Octobre. Des informations sur les itinéraires techniques, les profils de sol et le rendement par parcelle ont été collectées chez 6 agriculteurs, sur environ 500 ha et 30 parcelles de maïs. Des cartes de rendement ont été réalisées sur ces parcelles avec une résolution compatible avec celle des images satellitales.

En amont du travail de modélisation, les images peuvent aider à spatialiser des paramètres d'entrée du modèle tels que les profils de sols ou les itinéraires techniques. Elles ont ici été utilisées pour segmenter les parcelles de maïs en zones homogènes sur lesquelles on a appliqué le modèle de fonctionnement des cultures. Cela permet de proposer une organisation spatiale à un niveau d'échelle compatible avec le travail intraparcellaire des agriculteurs.

Sur chaque zone homogène, on a utilisé le modèle STICS-feuille en le forçant avec des données journalières d'indice de surface foliaire (LAI) issu des images de télédétection. Pour cela chaque image a été traitée pour générer une carte de LAI du maïs. Ensuite le module d'interpolation de STICS a été utilisé pour produire une valeur journalière de LAI à partir de ces mesures de LAI calculé aux sept dates, sur chaque zone homogène. L'utilisation de ce module impose de disposer d'un nombre suffisant d'images en début de cycle, ce qui peut être rendu difficile par les conditions climatiques de fin de printemps.

Si on compare les rendements moyens simulés pour chaque parcelle avec et sans forçage par le LAI issu de la télédétection on n'observe pas de différence significative. Une analyse de la variabilité intraparcellaire a été faite par comparaison des cartes de rendement simulé (avec un forçage par zone homogène) avec les cartes de rendement mesuré (par des capteurs des moissonneuses).

Pour une partie des parcelles, on a une bonne correspondance entre le rendement simulé et celui issu des capteurs, aussi bien pour une analyse par zone homogène que pour une analyse par pixel. D'autres parcelles présentent des erreurs dans le zonage intraparcellaire. Cette mauvaise segmentation semble due à des erreurs de traitement des images. Un problème fréquent est lié à la géométrie des données satellitales. Les imprécisions de calage sont le plus souvent de l'ordre du pixel. Cela entraîne une évolution incohérente des LAI calculés pour les pixels en bordure de parcelle mais aussi pour ceux localisés en limite de zone homogène. Une autre source de perturbation est une mauvaise définition de la cible étudiée. En effet les traitements produisent des informations aberrantes s'ils sont appliqués sur des mauvaises herbes, des zones d'ombres en bordure de parcelles, voire sur des données acquises lors d'une irrigation.

La télédétection satellitale peut donc être utilisée à plusieurs niveaux pour améliorer la compréhension des phénomènes agronomiques. Les images ont été utilisées d'une part pour améliorer la spatialisation des résultats du modèle, d'autre part pour décrire une évolution temporelle des cultures qui intègre les phénomènes mal pris en compte par le modèle de simulation.

Ces premiers résultats encourageants ont permis de montrer l'importance du zonage intraparcélaire. L'analyse spatiale et la modélisation devront permettre de distinguer la part de variabilité stable dans le temps (la variabilité statique), des phénomènes liés au cycle cultural (la variabilité dynamique). Les difficultés concernant les images satellitaires sont principalement du domaine technique et devraient pouvoir être résolues par un filtrage des données sources.

## BAO-MdC. Une boîte à outils pour appliquer, paramétrer et évaluer des modèles de cultures

Daniel Wallach ([wallach@toulouse.inra.fr](mailto:wallach@toulouse.inra.fr)) et Marie-Hélène Charron ([mcharron@toulouse.inra.fr](mailto:mcharron@toulouse.inra.fr))  
UMR ARCHE, BP 27, 31326 Castanet Tolosan Cedex

### Introduction

Créer un programme informatique (un « simulateur ») pour faire des calculs avec un modèle de culture est un travail assez long et complexe. Souvent ce n'est pas tant la programmation des équations du modèle qui pose problème, mais plutôt la gestion des entrées et sorties et l'automatisation de différentes études basées sur le modèle. Plusieurs pistes ont été utilisées pour réduire le coût du développement informatique. Chacune est basée sur l'identification d'éléments communs entre différents modèles. Ces éléments peuvent être programmés une seule fois et non pas pour chaque modèle, d'où une économie de temps et d'effort.

Chaque modèle de culture a sa spécificité, dictée par le système modélisé et les objectifs et traduite par les équations du modèle. Néanmoins, différents modèles peuvent avoir des équations en commun. Profiter de ces équations communes est une des principales motivations pour des modèles de culture pluri-espèces comme EPIC, STICS ou CROPGRO (Boote et al. 2002). La gestion des entrées et les sorties des modèles est encore plus générale. Ce constat a été à l'origine du DSSAT (decision support system for agrotechnology transfert). Plusieurs modélisateurs se sont mis d'accord sur une liste commune de variables d'entrée, et ont adopté une programmation commune pour gérer les entrées et les sorties (Thornton et al. 1997). Acock et al. (1999) adopte une approche différente. Ils proposent un logiciel qui peut être utilisé avec des modèles de culture existants. Pour eux, l'élément commun est que les modèles de culture lisent les variables d'entrée à partir de fichiers ASCII. Ils ont alors développé un logiciel pour gérer les fichiers d'entrée quel que soit (ou presque) le modèle de culture.

Il y a d'autres besoins en programmation qui sont très importants pour le développement et l'utilisation de modèles de culture, qui ont beaucoup de ressemblances pour différents modèles de culture, mais qui n'ont pas encore fait l'objet d'un travail de mise en commun. Parmi ces besoins il y a l'ajustement des paramètres d'un modèle de culture, l'analyse de sensibilité, la comparaison entre valeurs observées et valeurs calculées et enfin l'utilisation du modèle pour faire des expériences multifactorielles sur ordinateur. L'objectif du logiciel présenté ici est de réaliser ces tâches. Le logiciel est censé fonctionner avec des modèles de culture existants.

Les motivations pour ce logiciel sont d'une part d'éviter la nécessité de reprogrammer ces tâches pour chaque modèle de culture, d'autre part de fournir des méthodes éprouvées aux utilisateurs des modèles.

Ce logiciel, appelé BAO-MdC, est en cours de développement. Une grande partie de l'architecture de base a été stabilisée, et des fonctions liées à l'expérimentation multifactorielle et à l'analyse de sensibilité sont opérationnelles.

Dans la suite, on présente d'abord l'interaction entre le logiciel BAO-MdC et un simulateur. Ensuite on présente la liste de fonctionnalités du logiciel, aussi bien celles qui existent que celles qui sont prévues. Dans une dernière partie on parle de la suite du travail.

### Interaction entre BAO-MdC et un modèle de culture

#### Les éléments d'un modèle de culture traités par le logiciel

Le logiciel BAO-MdC est basé sur le fait que la plupart des modèles de culture lisent les informations d'entrée, les valeurs des observations et les valeurs des paramètres à partir de fichiers ASCII, écrivent des résultats dans d'autres fichiers ASCII, et ont un module exécutable. Outre l'existence de ces éléments, il y a peu de contraintes pour pouvoir utiliser le logiciel avec un modèle de culture. Les fonctionnalités du logiciel sont réalisées en lisant et en écrivant les différents fichiers, et en appelant l'exécutable.

#### Fichiers avec des variables d'entrée,

Bao-MdC suppose que le modèle de culture lit les variables d'entrée à partir d'un ou plusieurs fichiers ASCII. BAO-MdC utilise la notion de « campagne » pour indiquer l'ensemble des informations nécessaires en entrée.

BAO-MdC a besoin de connaître la structure de chaque catégorie (sol, climat, etc.) de fichier d'entrée. Pour cela, il faut fournir au logiciel un fichier par catégorie qui décrit la structure des informations dans les fichiers de la catégorie. Cette description doit se faire dans le langage propre du logiciel, qui est basé sur celui d'Acock et al. (1999). Le logiciel ne peut pas traiter des fichiers d'entrée dont la structure ne peut pas être décrite avec son langage. Actuellement, le logiciel accepte deux types de présentation des informations.

D'abord, un fichier d'entrée peut avoir des lignes avec n'importe quelle combinaison de texte et de chiffres, et les chiffres peuvent être écrits avec n'importe quel format. Par exemple,

```
Date de semis          116  
20.6 10 pourcentage d'argile, pourcentage de cailloux
```

L'autre structure acceptable est celle d'un tableau, où chaque ligne du tableau a le même format. Le nombre de lignes du tableau peut être fixé ou donné dans le fichier d'entrée. Sinon, la fin du tableau peut être indiquée par un mot clé ou par la fin du fichier. Par exemple, le tableau suivant donne la date et quantité pour 2 irrigations. La première ligne précise le nombre d'irrigations.

```
Nombre d'irrigations 2  
170      40
```

**Fichiers avec les valeurs des paramètres**

BAO-MdC suppose que le modèle de culture lit les paramètres du modèle à partir d'un ou plusieurs fichiers ASCII. (Il pourrait y avoir d'autres paramètres programmés « en dur » dans le code, mais BAO-MdC ne pourra pas agir sur ces paramètres). Comme pour les fichiers d'entrée, il faut décrire la structure de chaque fichier de paramètres.

**Fichiers avec des options concernant le fonctionnement du simulateur**

Un modèle de culture peut avoir besoin d'un ou de plusieurs (ou de zéro) fichiers pour préciser les options de la simulation, par exemple pour préciser si on prend en compte ou non l'effet azote. Le logiciel BAO-MdC permet de définir quels fichiers seront utilisés, mais autrement n'interagit pas avec ces fichiers.

**Fichiers de sortie**

BAO-MdC suppose que le modèle de culture écrit plusieurs fichiers de sortie. A l'encontre des cas précédents, BAO-MdC exige ici que deux de ces fichiers aient une structure particulière. Il faut qu'il y ait un fichier de sortie avec une seule ligne, qui peut contenir n'importe quelle série de résultats de la simulation (par exemple rendement, biomasse finale, date de floraison, etc). Quand BAO-MdC lance des simulations multiples, il ne garde que cette ligne comme résultat de chaque simulation. Il faut par ailleurs qu'il y ait un fichier avec des résultats journaliers, une ligne par jour avec la date au début. Le logiciel BAO-MdC pourra chercher dans ce fichier pour trouver des résultats du modèle qui correspondent aux valeurs observées. Il peut y avoir d'autres fichiers de sortie, qui ne sont pas utilisés par BAO-MdC.

**Fichiers avec valeurs observées**

Pour certaines fonctionnalités, BAO-MdC doit faire une comparaison entre valeurs observées et valeurs calculées. Pour cela, il faut non seulement les fichiers avec les valeurs observées, mais également des informations qui permettent de trouver les valeurs calculées qui correspondent aux valeurs observées. Le logiciel aura son propre langage pour définir cette correspondance.

**Module exécutable.**

Le logiciel fait exécuter le modèle en appelant le module exécutable. Le modèle de culture peut alors être écrit dans n'importe quel langage informatique qui donne lieu à un fichier exécutable, et en particulier peut être en Fortran ou en C++.

**Comment ajouter un nouveau modèle de culture**

Avant de travailler avec un nouveau modèle de culture, il y a un certain travail préliminaire de préparation du logiciel. Soulignons qu'il ne s'agit pas d'un travail de programmation. On n'a pas besoin de modifier ni le logiciel BAO MdC, ni le module exécutable du modèle de culture. Néanmoins, ce travail demande une certaine connaissance du modèle de culture. Le travail préliminaire comprend;

1. installer l'exécutable du modèle dans le répertoire des modèles du logiciel
2. créer ou récupérer des fichiers d'entrée, des fichiers de paramètres et des fichiers d'observations. (Ce travail n'est pas spécifique à l'utilisation du logiciel BAO MdC. Il serait nécessaire pour toute utilisation du modèle avec ces fichiers d'entrée).
3. décrire dans un fichier texte la structure de chaque fichier d'entrée, de chaque fichier de paramètres et des fichiers de sortie.
4. décrire dans un fichier texte la correspondance entre les variables d'un fichier de valeurs observées et les variables des fichiers de sortie du modèle.

**Fonctionnalités**

La liste suivante présente les fonctionnalités prévues dans un premier temps pour ce logiciel. Le logiciel est évolutif, cette liste n'est donc pas close.

**Expérimentation multifactorielle avec modèle****Les variables d'entrée ou paramètres comme facteurs**

Cette fonctionnalité permet de faire facilement un grand nombre de simulations, en faisant varier une ou plusieurs variables d'entrée (par exemple, profondeur du sol, teneur initiale en eau du sol, date, densité de semis). On peut également faire varier des valeurs des paramètres.

L'utilisateur choisit une campagne de base pour l'étude, ou une liste de campagnes. Le logiciel affiche dans un menu la liste des variables d'entrée pour ce simulateur, avec les valeurs pour la campagne. L'utilisateur choisit les variables d'entrée à faire varier, et les valeurs pour chacune. Le logiciel fabrique des fichiers d'entrée correspondants à ces valeurs, appellent le modèle de culture autant de fois qu'il y a des valeurs, et crée un fichier avec une ligne pour chaque simulation. Ce fichier résultat peut ensuite être facilement traité par tableur.

Un exemple de cette fonctionnalité serait un utilisateur qui décide de tester des valeurs de densité de semis de 60000, 65000, 70000,...12000 pieds/ha (au total 13 valeurs différentes), les jours de semis de 90, 100, 110, 120 et 130 (5 valeurs) et des valeurs d'apport d'azote de 100, 105, 110, 115,...250 kg/ha (au total 31 valeurs). Le logiciel BAO-MdC appellerait le simulateur  $13 \times 5 \times 31 = 2015$  fois, en parcourant toutes les combinaisons de valeurs.

**Evaluation**

Le logiciel doit permettre de comparer facilement valeurs observées et valeurs calculées, et de calculer des mesures de distance entre les deux. L'utilisateur choisit une liste de campagnes qui sont associées avec des fichiers d'observations. Le logiciel appelle le simulateur pour chaque campagne, et identifie dans chaque cas les valeurs calculées qui correspondent aux valeurs observées. Le logiciel crée un nouveau fichier avec valeurs observées et valeurs calculées correspondantes. Le logiciel calcule différentes mesures de distance entre valeurs observées et valeurs simulées.

### **Analyse de sensibilité**

#### **Un paramètre à la fois ou une variable d'entrée à la fois**

Cette fonctionnalité permet d'explorer l'effet de changer la valeur d'un paramètre ou d'une variable d'entrée sur les valeurs des variables de sortie du modèle. Les autres paramètres ou variables d'entrée gardent leurs valeurs de départ. Plusieurs mesures de sensibilité sont proposées.

L'utilisateur précise une campagne de base ou une liste de campagnes. Le logiciel affiche dans un menu la liste des paramètres ou variables d'entrée pour ce simulateur, avec leurs valeurs. L'utilisateur choisit les paramètres ou variables d'entrée à étudier, et la ou les mesures de sensibilité à calculer. Enfin, l'utilisateur choisit des variables de sortie, parmi les variables que le simulateur met dans le fichier sortie d'une ligne.

L'utilisateur peut demander de calculer la sensibilité locale (la dérivée de chaque variable de sortie choisie par rapport à chaque paramètre ou variable d'entrée étudié), ou la sensibilité relative. Il peut par ailleurs demander des graphiques, en précisant les valeurs minimales et maximales de chaque paramètre ou variable d'entrée, ainsi que le nombre de valeurs intermédiaires. Le logiciel calcule ou dessine, pour chaque campagne, la sensibilité de chaque variable de sortie par rapport à chaque paramètre ou variable d'entrée.

#### **Plusieurs paramètres ou variables d'entrée à la fois**

La sensibilité des sorties d'un modèle à un paramètre ou variable d'entrée dépend des valeurs des autres. Il doit y avoir donc des fonctionnalités pour explorer la sensibilité du modèle en prenant en compte ces interactions. Elles doivent inclure des mesures de sensibilité globale et la décomposition de cette sensibilité en termes représentant les paramètres ou variables d'entrée individuels et leurs interactions. Le logiciel doit par ailleurs calculer la contribution d'incertitudes sur les paramètres à MSEF.

### **Ajustement des paramètres**

L'ajustement des paramètres d'un modèle de culture est l'un des problèmes les plus difficiles dans le développement de ces modèles. Il n'y a pas de consensus sur la meilleure façon d'effectuer cet ajustement. Parmi les propositions il y a l'ajustement d'un faible nombre de paramètres (choisis par analyse de sensibilité, par une méthode de choix de modèle de type BIC ou de type validation croisée ou par une fonction de pénalisation adaptée), la régression ridge et l'utilisation d'une approche Bayésienne. La méthode à mettre en œuvre dans le logiciel n'est pas encore arrêtée (thèse en cours). Le logiciel doit par ailleurs calculer MSEF par validation croisée pour le modèle avec paramètres ajustés.

#### **Etat du logiciel (janvier 2003) et suite**

Les fonctionnalités liées à l'expérimentation factorielle sont disponibles. L'analyse de sensibilité par rapport à un seul paramètre ou par rapport à une seule variable d'entrée sont également opérationnelles. Par contre, tout ce qui concerne la comparaison entre valeurs observées et valeurs calculées est encore à l'état de projet. La suite du travail doit se faire en étroite collaboration avec des utilisateurs et développeurs de modèles.

### **Bibliographie**

- Acock, B., Pachepsky, Y. A., Mironenko, E. V., Whisler, F. D., and Reddy, V. R. (1999). GUICS : A generic user interface for on-farm crop simulations. *Agronomy Journal* **91**, 657-665.
- Boote, K. J., Minguez, M. I., and Sau, F. (2002). Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. *Agronomy Journal* **94**, 743-756.
- Thornton, P. K., Bootlink, H. W. G., and Stoorvogel, J. J. (1997). A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model outputs. *Agronomy Journal* **89**, 620-627.

## Sensibilité de STICS 4 aux fonctions de pédotransfert (FTP) Simulation du rendement en parcelle hétérogène

N. Beaudoin<sup>1</sup>, B. Nicoullaud<sup>2</sup>, V. Houlès<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>INRA Unité d'Agrochimie de Laon Péronne Reims 02007 <sup>2</sup>INRA Science du sol 45166 Orléans

### 1. Contexte et objectif

STICS est paramétré sur deux parcelles de 10 ha pour y moduler spatialement la fertilisation azotée de la culture de blé tendre, à Chambry (Aisne). Le choix est d'établir des FTP empiriques locales des propriétés hydriques, à partir de nombreuses mesures vs utiliser celle, plus générale, associée à la carte des sols au 1/25000<sup>e</sup> du département. Leurs impacts sur les prédictions de STICS 4 sont comparés.

### 2. Détermination de règles locales de pédotransfert des propriétés hydriques

L'humidité pondérale à la capacité au champ (Hcc) est estimée égale à la moyenne des mesures *in situ* de teneur en eau effectuées en février. Les valeurs obtenues sur des tranches homogènes sont regroupées par classe de texture; elles varient de 6 à 24%. L'humidité pondérale à pF 4,2 (Hpf) est mesurée *in vitro* sur des échantillons représentatifs des matériaux; elle varie de 2,2 à 14%. La densité apparente est mesurée *in situ* par profils entiers; elle varie de 1,35 à 1,70. L'enracinement potentiel est déterminé à l'aide de cartes verticales du nombre d'impacts de racine par unité de surface. Les profondeurs maximales d'extension des systèmes racinaires varient de 45 à 160 cm. La confrontation des cartes d'impacts et d'horizons pédologiques a permis d'établir des relations qualitatives de pédotransfert pour le paramètre « obstarac de STICS, certains horizons sont jugées non colonisables.

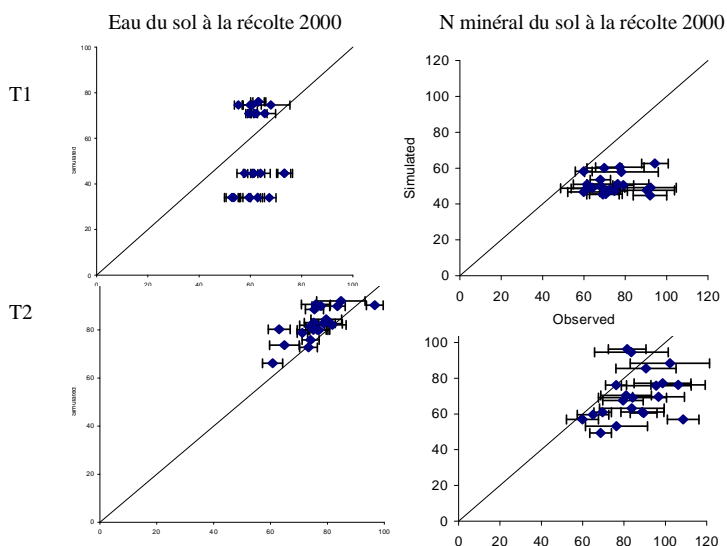
### 4.2. Sensibilité de Stics au niveau de résolution de la carte et des règles associées

Le modèle STICS a été appliqué à la parcelle Chambry1, avec trois méthodes de paramétrage des paramètres DA, Hcc et Hpf, allant du plus général au plus local :

- T1 : la carte des sols au 1/25000<sup>e</sup> et les tables de pédotransfert associées;
- T2 : la carte des sols au 1/2500<sup>e</sup> et les règles décrites précédemment ;
- T3 : la règle T2 avec la valeur d'humidité mesurée pour chaque tranche.

Les valeurs de profondeur maximale d'enracinement sont issues de la présente étude. Pour les années en cours, les prédictions du stock d'azote et du stock d'eau sont meilleures avec T2 qu'avec T3, mais pas pour le rendement : cela est dû à l'absence de stress hydrique durant le printemps 2000.

Des simulations ont été conduites pour une année à la pluviométrie estivale normale. Les sorties obtenues avec T2 sont très proches de celles obtenues avec T3, ce qui montre que la règle de pédotransfert établie localement (T2), est performante. Par contre, les sorties issues de T1 sont très différentes et avec des écarts plus importants.



### Conclusion

La grande sensibilité des sorties du modèle aux FTP et/ou au niveau de résolution de la carte qui leur est associée confirme l'intérêt d'un paramétrage indépendant du modèle. L'utilisation de fonctions générales FTP doit se faire après vérification de leur domaine de validité. L'établissement de fonctions locales de type probabiliste est préférable.

Mise en forme : Puces et numéros

Mise en forme : Puces et numéros

Mise en forme : Puces et numéros

## Forçage du Modèle STICS par l'INDICE FOLIAIRE application à la télédétection

Dominique RIPOCHE<sup>1</sup>, Marie WEISS<sup>2</sup>, Laurent PRÉVOT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRA, Climat, Sol et Environnement, bâtiment climat, Domaine St Paul - Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9, France

<sup>2</sup> NOVELTIS, parc Technologique du canal, 2 avenue de l'Europe, 31520 Ramonville Saint-Agne, France

### Introduction

L'indice foliaire est une variable d'état centrale dans les modèles de culture. Elle pilote l'accumulation de biomasse par interception du rayonnement et détermine les besoins en eau et en azote de la plante. L'évolution de l'indice foliaire est déterminée, entre autres, par des caractères spécifiques (développement, taille des feuilles, etc.) et par l'itinéraire technique de la culture (date de semis, irrigation, fertilisation, etc.) que l'on ne connaît pas toujours lorsqu'on souhaite appliquer le modèle à une échelle régionale. Par ailleurs, les techniques de télédétection permettent d'estimer un indice foliaire « efficace » pour l'interception du rayonnement, à partir de combinaisons de réflectances mesurées dans diverses bandes spectrales. Nous présentons une technique permettant d'utiliser directement ces informations spectrales dans le modèle STICS. À partir de quelques observations réparties tout au long du cycle, nous réalisons l'ajustement d'une relation statistique représentant l'évolution du LAI, qui génère des valeurs journalières utilisées comme variables de forçage du modèle. Cette méthode a été mise en œuvre pour estimer des grandeurs d'intérêt agronomique (biomasse, consommations en eau et en azote) sur les parcelles de blé de la zone d'étude Alpilles-ReSeDA.

### Matériels et méthodes

STICS est un modèle de culture capable de simuler un cycle de culture pour différents scénarios culturaux. Le modèle simule les processus de croissance et de développement de la culture et les bilans hydrique et azoté du système sol-plante. Les entrées sont le climat, le sol et les techniques culturales. Les données de sorties sont de type production (quantité et qualité) et de type environnementales. Une variante du modèle STICS, appelé « STICS-feuille » utilise l'indice foliaire comme donnée d'entrée. Cette façon de forcer le modèle peut être très utile dans les phases de développement du modèle. De plus, dans le cas de stress précoces, la variabilité de l'indice foliaire de la culture causée par les déficits hydriques et/ou azotés est telle que les stress simulés par STICS-feuilles peuvent être extrêmement faibles. En imposant les valeurs d'indice foliaire, les niveaux des besoins hydriques et azotés correspondant à ces stress sont eux aussi implicitement imposés.

Les données proviennent de la campagne Alpilles-ReSeDA (Prévo et al., 1998). Le site expérimental était localisé près d'Avignon, France (N43°47', E4°45'). Les cultures de blé ont été étudiées d'octobre 1996 à novembre 1997. Les données climatiques ont été mesurées au centre du site. Les mesures biologiques (surface de feuille, biomasse totale) ont été réalisées chaque semaine, tout au long du cycle de la culture. Les indices foliaires ont été mesurés avec un planimètre. Les images de télédétection ont été acquises à différents angles de visée, à l'aide d'une caméra multi-spectrale aéroportée (simulateur POLDER) dans les canaux du visible et du proche infra-rouge, à 10 dates au cours du cycle de la culture. La réflectance au sommet du couvert, fonction des angles de visées, a été déterminée pour chacune des parcelles de blé après applications de corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques.

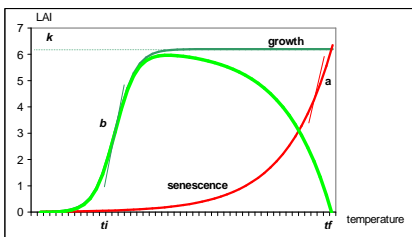


Nous avons utilisé une approche de type physique, basée sur les réseaux de neurones (Weiss et Baret, 1999) pour estimer l'indice foliaire à partir des valeurs directionnelles de réflectance.

Dans les deux cas - indice foliaire mesuré et estimé à partir de données de télédétection - l'équation utilisée pour représenter l'évolution temporelle de l'indice foliaire est :

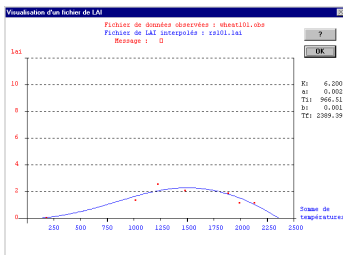
$$LAI(d) = k * \left( \frac{1}{1 + \exp(-b * (St(d) - ti))} \right) - \exp(a * (St(d) - tf))$$

où  $St$  est la somme de degrés-jours depuis la levée, et  $k$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $ti$ , et  $tf$  sont des paramètres pouvant être estimés par régression non-linéaire.

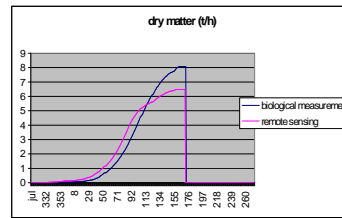


## Résultats

### Indice foliaire estimé par télédétection

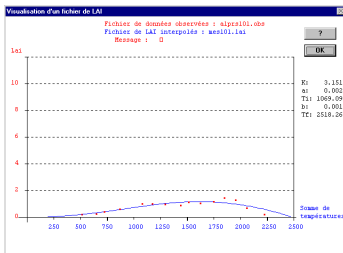


Simulé par STICS

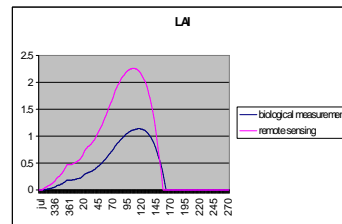


Matière sèche  
Rendement  
Transpiration  
Azote dans la plante

### Indice foliaire mesuré



Simulé par STICS



## Références

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., et al., 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* 5-6

Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., et al., STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Assessment by comparing with experimental reality for wheat and corn ó *Agronomie* submitted

Prévo L., Baret F., Chanzy A., Olioso A., *et al.*, 1998. Assimilation of multi-sensor and multi-temporal remote sensing data to monitor vegetation and soil: the Alpilles-ReSeDA project. IGARSS08, International Geoscience And Remote Sensing Symposium, Seattle (USA).

Weiss, M. and Baret, F., 1999. Evaluation of canopy biophysical variable retrieval performances from the accumulation of large swath satellite data. *Remote Sens. Environ.*, 70: 293-306.

## Méthodologie d'identification de la qualité du blé dur

Stéphanie Juin, Iñaki Garcia de Cortazar, Nadine Brisson.  
INRA-Avignon, Unité CSE

En milieu méditerranéen, les céréales, et en particulier le blé dur sont souvent cultivées dans des environnements difficiles. Aussi est-il rare d'atteindre les potentiels de rendement à cause des conditions de sécheresse à la fois édaphiques et climatiques. Pourtant, il n'est pas sûr que la qualité soit dépréciée car une idée couramment répandue oppose qualité et quantité.

La qualité du blé dur est multicritère. Le blé dur idéal pour un semoulier possède les caractéristiques suivantes (Abecassis et al, 1996) ; il est gros (poids de mille grains élevé) et vitreux (peu de mitadinage) ; il a des enveloppes fines (rendement semoulier élevé), une faible teneur en matières minérales (faible taux de cendre) et une teneur en protéines élevée ; il possède un gluten ferme et élastique, contient beaucoup de caroténoïde (indice de jaune élevé), mais a des activités lipoxygénasiques et peroxydasiques faibles (indices de jaune élevé et de brun faible) et ne possède pas de coloration brune autre que son germe (pas de moucheture). Actuellement la principale clé d'explication de la qualité du blé dur utilisée par les industriels et les semenciers est la variété. Cependant l'héritabilité des diverses composantes de la qualité est plus ou moins importante et des explications de l'élaboration de la qualité sont à rechercher dans les conditions pédoclimatiques et techniques de croissance de la culture.

L'objectif de notre travail est de séparer les composantes génétiques et environnementales de l'élaboration de la qualité du blé dur dans un contexte régional à partir d'expérimentations et du modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998). Celui-ci va dans un premier temps être paramétré variétalement, puis utilisé comme générateur de données contraint par les mesures et comme outil d'interprétation des interactions génotype- environnement. Au terme de l'étude, il devra également accueillir un module de qualité des grains, connectable aux autres modules de ce modèle. Une étude préalable a été réalisée afin de mettre en place la méthodologie et d'obtenir des premiers résultats.

### Méthodologie générale (figure 1)

Le but de ce travail est de modéliser la qualité du blé dur pour un environnement

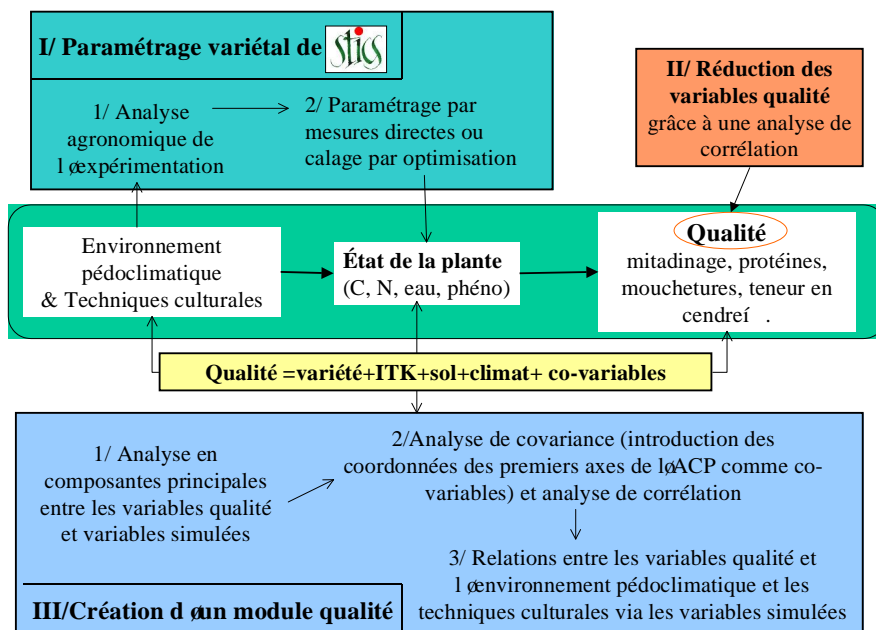


Figure 1: schéma récapitulatif sur la méthodologie

pédoclimatique et des techniques culturales données. Pour ce faire, l'étape indispensable sera la simulation d'ensemble de variables physiologiques des plantes via le modèle de culture STICS qui aura été préalablement paramétré variétalement (Fig.1.-I). La création d'un module qualité connecté aux autres modules de STICS, permettra de mettre en relation les variables qualité sélectionnées (Fig.1.-II) avec l'état et l'environnement des plantes (Fig.1.-III).

## II Paramétrage variétal

### A. Expérimentation

Actuellement une expérimentation agronomique est en place sur le site de l'INRA d'Avignon pour une durée de 2 ans (2001-2003), afin de permettre de caractériser la variabilité génétique de cette plante grâce au suivi du comportement de sept variétés de blé dur (acalou, artimon, nefer, allur, lloyd, orjaune et arcalis) en condition sèche, sous un abri mobile, et en conditions irriguées. Des mesures biologiques (LAI, biomasse, azote plante, composantes du rendement en quantité et qualité) et édaphiques (eau et azote du sol) sont réalisées en dynamique.

Parallèlement, le suivi de onze parcelles d'agriculteurs pendant deux ans (2000-2002) réparties dans la région provençale a permis de constituer une base de données qui permettra de caractériser la variabilité pédoclimatique de la qualité du blé dur.

### B. Méthodologie

L'objectif du paramétrage variétal est la consolidation de STICS dans ses prérogatives actuelles. Il est basé principalement sur le jeu de données issus de l'expérimentation d'Avignon.

- Dans un premier temps, l'analyse agronomique de l'expérimentation réalisée sur le site d'Avignon permettra de choisir les paramètres pertinents sur lesquels vont reposer les différences variétales à partir d'analyses de variance.
- Le paramétrage variétal sera ensuite réalisé soit grâce à des mesures directes de paramètres, soit par optimisation (calage des paramètres sur une variable observée). En parallèle on réalisera un diagnostic sur le caractère variétal et le caractère spécifique de chaque paramètre modifié.
- Enfin, la validation STICS-variétal sera réalisée grâce aux jeux de données du réseau de parcelles agriculteur (2001-2002).

L'analyse agronomie a comme but de traduire la dynamique de chaque variable écophysologique à partir de paramètres intégrant la dynamique de ces variables ou étant des valeurs synthétiques. Par exemple, l'évolution de la biomasse sèche a été représentée par l'intermédiaire d'une équation de la forme  $Y = K * (1 / (1 + \exp(-a * (x - T))))$  (cf. figure 2) et du calcul de l'intégrale de cette équation entre le semis et la floraison et entre la floraison et la récolte. Ainsi, pour cette variable, 5 paramètres ont été calculés pour les sept variétés et pour les deux traitements.

Une analyse de variance à deux facteurs permet ensuite de déterminer l'influence de la variété et du traitement sur l'ensemble de ces paramètres, et de dégager des pistes pour le paramétrage de STICS pour les sept variétés de blé dur étudiées (cf. tableau 1).

### Résultat

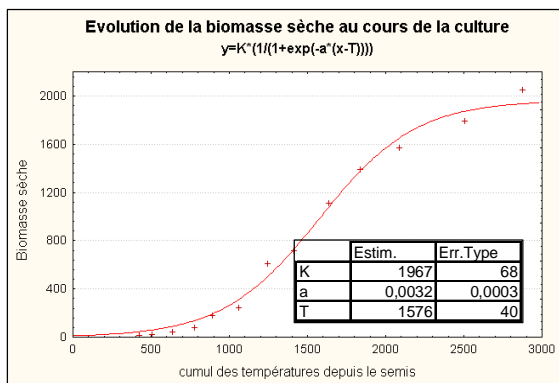


Figure 2: exemple d'estimation (et d'erreur type) de paramètres pour la biomasse sèche.

Tableau 1: exemples de résultats obtenus à partir de l'analyse de variance des paramètres caractérisant les dynamiques physiologiques et conséquence pour la paramétrisation variétale du modèle STICS.

	paramètres influencés par la variété	pistes de travail dans STICS	ajustement par
indice foliaire	intégrale du LAI	durée de vie des feuilles (DURVIE)	optimisation
	a (LAI)		vérification
Développement	somme des températures entre le semis et le stade épi 1 cm	levée	paramétrage direct
		Photopériode	optimisation
		durée thermique	paramétrage direct
Morphologie	phyllotherme	plastrochrone	paramétrage direct
	nombre de feuilles		vérification
rendement	poid de mille grains	poid de mille grains max	optimisation
	nombre de grains /m <sup>2</sup>	nombre de grains maxi /m <sup>2</sup>	optimisation
Azote	Vitesse d'augmentation de l'indice de récolte azoté	VITIRAZO	paramétrage direct

### III. Vers un module de Qualité

Ce module sera intégré au modèle STICS et aura comme objectif de simuler la qualité du blé dur.

#### A. Expérimentation

Dans le cadre de la mise en place de la méthodologie, une première expérimentation avec quatre variétés de blé dur (acalou, lloyd, artimon et ardente), trois types de fertilisation et trois types de sols a été réalisée à l'INRA d'Avignon en 1999-2000. Les résultats présentés dans cette partie sont issus du travail préliminaire réalisé avec ces données expérimentales.

#### B. Retour sur la méthodologie

##### 1. Réduction du nombre de variables qualité

Afin de travailler sur un nombre limité de composantes de la qualité, nous réaliserons une étude corrélative pour voir s'il existe des relations entre les différentes variables qualité afin de réduire leur nombre.

##### 2. Recherche de relation entre les variables qualité et les variables écophysologiques

Nous rechercherons ensuite le déterminisme composantes qualité ó variables de croissance, grâce à des analyses de statistiques (données issues du réseau agriculteurs et de l'expérimentation Avignon).

➤ Nous réaliserons, dans un premier temps, des **analyses en composantes principales** entre les variables de qualité et les variables écophysologiques mesurées et simulées par STICS afin d'obtenir une organisation des données variables qualité suivant deux ou plusieurs composantes.

➤ Ensuite, des **analyses de covariance** avec introduction des coordonnées des premiers axes de l'ACP comme co-variables, nous permettrons en association avec une **étude corrélative** de mettre en relation les facteurs variété, sol, climat et l'itinéraire technique avec la qualité du blé dur par l'intermédiaire de covariables comme la croissance, le rendement ou d'autres variables simulées par STICS.

➤ A partir des **pistes données par les analyses de variance**, nous rechercherons les relations existantes entre les variables de qualité et les facteurs (variété, sol) et l'influence des covariables déterminées par l'ACP.

➤ Les relations ainsi déterminées seront « connectées » à STICS, grâce à l'intégration d'un **nouveau module « qualité »** dans ce modèle.

##### 3. Validation du module

La validation de ce module sera réalisée à partir de données fournies par l'ITCF.

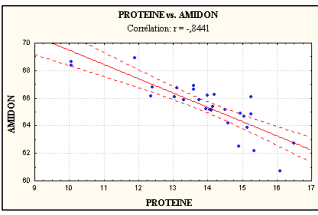
#### C. Résultats

##### 1. Corrélation

Les résultats obtenus avec l'étude préliminaire montrent des relations assez importantes entre les protéines - amidon ó amidon ó clarté (tableau 2). Cependant, les cendres ne montrent pas de relations importantes avec d'autres variables qualité (G<sup>a</sup> de Cortázar, 2002).

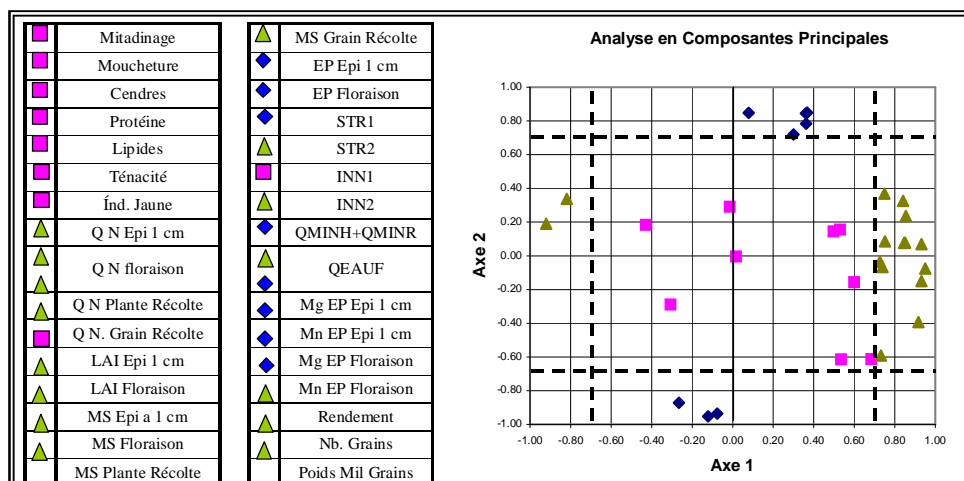
**Tableau 1 : résultats de l'analyse de corrélation entre les variables qualité**

Mitadinage	1.00						
Moucheture	-0.17	1.00					
Cendres	-0.26	-0.07	1.00				
Protéines	<b>-0.83</b>	-0.08	<b>0.35</b>	1.00			
Lipides	<b>0.47</b>	-0.23	<b>-0.39</b>	<b>-0.44</b>	1.00		
Amidon	<b>0.66</b>	0.15	-0.30	<b>-0.84</b>	<b>0.38</b>	1.00	
Ténacité	<b>-0.49</b>	-0.13	<b>0.36</b>	<b>0.49</b>	<b>-0.43</b>	1.00	
Clarté	<b>0.78</b>	0.12	-0.16	<b>-0.85</b>	0.09	<b>-0.35</b>	1.00
Ind. Jaune	-0.27	-0.21	0.07	0.13	0.06	0.28	1.00
	Mitadinage	Moucheture	Cendres	Protéines	Lipides	Ténacité	Ind. Jaune
<b>0.78</b>	Corrélations significatives marquées à p < 0.05						
0.36	Corrélations significatives marquées à p entre 0.1 et 0.05						



### 2. Analyse en composante principale

Cette analyse donne deux axes orthogonaux principaux représentant les variables croissance, rendement (axe 1) et les variables de stress (axe 2) (cf. figure 3).



**Figure 3 : résultats de l'analyse en composantes principales**

### 3. Analyses de covariance et de corrélation

Nous avons observé deux types de relations entre les composantes qualité et les facteurs variété, sol et fertilisation (Cf. tableau 3).

- des relations directes (il y aurait par exemple une relation directe entre la variable qualité teneur en lipides et le facteur variété)
- des relations indirectes (la relation entre le mitadinage et le facteur variété est relié via les co-variables croissance et rendement définies par l'ACP).

Les résultats obtenus montrent des relations assez importantes entre les variables qualité et les variables croissance à certains stades (par exemple mitadinage et protéines avec les stades de floraison et récolte).

**Tableau 2 : synthèse des résultats des analyses de covariance et de corrélation**

	Mitadinage	Moucheture	Cendres	Protéine	Lipides	Ténacité	Ind. Jaune
<b>Variété</b>	Croissance et rendement	Croissance et rendement	Variables Stress	Croissance et rendement	Relation direct entre Variété et Lipides	Croissance et rendement	Croissance et rendement
		Variables Stress					Variables Stress
<b>Sol</b>	Croissance et rendement	Croissance et rendement	Pas de relation	Croissance et rendement	Pas de relation	Pas de relation	Pas de relation
		Variables Stress					Pas de relation
<b>Fertilisation</b>	Pas de relation	Pas de relation	Variables Stress	Croissance et rendement	Relation direct entre Fertilisation et Lipides	Pas de relation	Croissance et rendement
							Variables Stress

### Conclusion

Dans ce travail, le modèle de culture STICS est utilisé comme outil d'intégration des connaissances acquises sur le fonctionnement de la culture du blé dur, d'accueil d'études locales et régionales et d'extrapolation à des contextes semblables. Les résultats présentés dans cette étude sont à affiner et à confirmer avec des jeux de données plus importants. A ce titre, ils sont encore à prendre avec précaution.

La compréhension de l'élaboration de la qualité peut aider les agriculteurs à réaliser les bons choix techniques (variété et fertilisation) en fonction des contraintes de leur milieu pédoclimatique. Elle peut également guider les industriels à réaliser des lots en fonction des variétés et des provenances, et aider les semenciers à intégrer la dimension « environnement /petite région de production» dans leurs schémas de sélection.

### Bibliographie

- ABECASSIS J., AUTRAN J.C., FEILLET P., (1996). Qu'est-ce que la qualité en 1996. Objectif qualité blé dur. ITCF, 52 pages.
- BRISSON N., RIPOCHE D., JEUFFROY M. H., RUGET F., NICOUILLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.P., MEYNARD J.M., DELECOLLE R., (1998). "STICS: a generic model for simulating of crops and their water and nitrogen balances.I. Theory and parametrisation applied to wheat and corn." *Agronomie* **18**: p 311-346.
- GARCIA DE CORTAZAR I., (2001). Méthodologie de l'analyse de la qualité du blé dur en région méditerranée. LYON, ISARA: 59 pages.

## Epistics, un modèle pour générer des calendriers de fertilisation et d'irrigation en arboriculture fruitière

Thomas NESME<sup>1</sup> et Nadine BRISSON<sup>2</sup>

Unités (1) Plante et Systèmes de culture Horticoles (PSH) et (2) Climat, Sol et Environnement (CSE)  
INRA, domaine StPaul, F84914, Avignon cedex 9

### Introduction

La quasi totalité des vergers situés en région méditerranéenne sont irrigués et fertilisés chaque année. Ces actes techniques, bien qu'ils ne représentent pas de lourds postes financiers dans les comptes de l'exploitation, occupent une place essentielle dans l'élaboration des performances agronomiques (Génard et Huguet, 1999), dans l'équilibre entre appareil végétatif et appareil reproductif (Weinbaum *et al.*, 1992) et dans les impacts environnementaux de la culture (Bellon *et al.*, 2001). Les pratiques d'irrigation et de fertilisation, actes techniques intimement liés pour l'agronome, sont rassemblées dans des calendriers. Ces derniers sont une liste chronologique de couples date\*dose, avec, pour la clarté de la représentation, un calendrier pour l'irrigation et un pour la fertilisation. Pour générer des calendriers théoriques, un modèle nommé Epistics a été créé en partant des formalismes contenus dans le modèle Stics (Brisson *et al.*, 1998).

L'article suivant précise les raisons de l'utilisation d'un modèle spécifique pour l'arboriculture fruitière et explicite quelques hypothèses à la base du travail. Les principes de modélisation sont décrits et le mode "génération de calendriers" est présenté.

### Pourquoi un modèle de génération de calendriers pour l'arboriculture fruitière ?

Le modèle Epistics doit permettre de générer des calendriers théoriques de fertilisation azotée et d'irrigation pour une gamme variée de systèmes de culture, de conditions de milieu et d'options de modélisation. Ces calendriers doivent *in fine* être confrontés aux calendriers des pratiques d'un groupe de 25 arboriculteurs situés dans la plaine de Mauguio-Lunel. Cette confrontation sert de base à une enquête agronomique portant sur les déterminants des pratiques de fertilisation et d'irrigation (Nesme, travaux en cours). Mais les intérêts du modèle vont au delà de cet aspect. En effet, les connaissances sur le fonctionnement hydrique et azoté du système sol-plante en arboriculture fruitière sont souvent dispersées, résultent d'études le plus souvent uniquement expérimentales, à des échelles variables et portent parfois sur des systèmes de culture anciens. Un des enjeux de l'élaboration de ce modèle est donc de donner une représentation intégrative du fonctionnement hydrique et azoté de la culture. D'un point de vue technique, ce modèle doit aider à la préconisation technique, en confrontant les conseils majoritairement issus de l'expertise aux résultats issus des formalisations scientifiques. Ainsi, le modèle devrait être utilisé afin de comprendre les résultats d'essais expérimentaux portant sur le fractionnement de la fertilisation azotée sur pommier (Hug, 2002 et travail en cours). Il devrait également être utilisé pour la mise au point et/ou la validation d'indicateurs d'impact environnementaux adaptés aux vergers (Bockstaller *et al.*, 1997).

### Principes de modélisation

Le premier fait marquant les connaissances sur l'eau et l'azote en verger est leur faible intégration. Celles ci sont largement issues d'expérimentations et les efforts de modélisation réalisés ne permettent de rendre compte de la dynamique de ces éléments qu'au sein de l'arbre (Rufat et DeJong, 2001) ou au sein d'un système simplifié solution nutritive-jeune arbre (Habib et Monestiez, 1987) mais pas encore au sein du système complexe sol-arbre. Il apparaît également que l'équilibre entre appareil reproductif et appareil végétatif (appelé "mise à fruit/vigueur") est mal connu et sa modélisation peu maîtrisée : cet équilibre dépend de la variété, du porte greffe, de l'âge de l'arbre, de sa nutrition, de la densité de plantation et de la taille pratiquée entre autres. Aussi la simulation de l'architecture de la plante et de la mise en place du LAI à l'aide de bilan de carbone s'avère aujourd'hui difficile. Par ailleurs, les vergers étant des cultures pérennes, la dynamique de l'azote au sein de la plante fait appel à des phénomènes de stockage dans les réserves et de remobilisations, phénomènes mal connus et dont les déterminismes semblent complexes (Habib, 1984). Enfin, les espaces entre rangs sont quasiment toujours occupés par un enherbement, dont la mise en place de la surface foliaire a été peu étudiée et qui présente des dynamiques de transpiration différentes de celles des arbres.

Pour toutes ces raisons, il est apparu difficile de modéliser la croissance des parties aériennes de l'ensemble arbre-herbe.



Le modèle Episticks a donc été généré à partir (i) de la "partie sol" du modèle Stics et (ii) du forçage des besoins de la plante en eau et en azote, sous l'hypothèse que ces besoins ne sont pas limités par les conditions de croissance c'est à dire que les stress hydriques et/ou azotés ne sont pas suffisamment forts pour limiter le LAI ou la biomasse par exemple (ce qui est le cas dans la plupart des vergers commerciaux). Le forçage des besoins de la plante a été réalisé en distinguant demande en eau et demande en azote.

La demande en eau est calculée comme  $kc*ETP$ ,  $kc$  représentant les coefficients culturaux d'un verger désherbé ou enherbé (disponibles auprès de la FAO<sup>3</sup>) et adaptés pour tenir compte du climat moyen et de la hauteur de la culture (Allen *et al.*, 1997).

La demande en azote est exprimée à partir d'une quantité totale d'azote absorbée au cours du cycle de culture ( $QN_{max}$ ) et dont la répartition de l'absorption suit dans le temps une loi logistique connue (Munoz *et al.*, 1993; Vaysse *et al.*, 2000). La quantité  $QN_{max}$  est calculée à partir des caractéristiques du verger (variété, âge, vigueur) et représente l'azote absorbé pour former les fruits, les feuilles, les bois de taille et l'accroissement des parties pérennes.

### La génération de calendriers ou Episticks en mode inverse

Les calendriers générés à l'aide du modèle Episticks sont des couples date\*dose correspondant à une irrigation et une fertilisation "optimales", c'est à dire n'entraînant ni stress pour la culture (pour l'eau et l'azote) et ni risque environnemental (pour l'azote). Le caractère optimal du calendrier est atteint par la recherche de maximisation de critères, différents pour l'eau et pour l'azote.

Pour l'eau, le critère à optimiser est la variable  $SWFAC$ , tout comme dans le modèle Stics. Ce critère est calculé comme le rapport entre transpiration réelle et transpiration maximale et est compris entre 0 et 1 (cette dernière valeur correspondant à la satisfaction totale des besoins de la plante). Lorsque  $SWFAC$  s'éloigne de sa valeur de consigne fixée par le modélisateur ( $RatioI$ ), une irrigation est déclenchée, avec une dose maximale fixée par la variable  $Dosimx$ .

Pour l'azote, le calcul est un peu plus compliqué que précédemment. En effet, pour l'irrigation, la variation du critère  $SWFAC$  est rapide lors d'un dessèchement du système sol-plante et l'apport d'eau par irrigation fait varier rapidement l'état hydrique du système. En revanche, la dynamique de l'azote présente une inertie beaucoup plus importante : une variable intégrative telle que la demande ou l'absorption d'azote par la plante traduit avec retard l'état azoté du système sol-plante et un apport de fertilisant azoté n'a pas d'effet immédiat sur la teneur en azote du sol. Aussi, nous avons imaginé un critère pour calculer automatiquement les fertilisations : sur une période de  $n$  jours, les besoins en azote de la culture ( $Demande$ ) et une fourniture prévisionnelle du sol ( $Offre$ ) sont calculés.  $Offre$  et  $Demande$  sont comparés et si  $Offre/Demande$  est inférieur à un paramètre  $RatioN$  fixé ( $\geq 1$  et traduisant une éventuelle politique "d'assurance" de satisfaction des besoins de la plante), alors on fertilise de

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ si } \frac{RatioN * Demande - Offre}{\text{efficacité.engrais}} < doseNmin \\ \min\left(\frac{RatioN * Demande - Offre}{\text{efficacité.engrais}}; doseNmax \right) \text{ sinon} \end{array} \right.$$

où  $doseNmin$  représente la quantité minimale d'engrais que l'on puisse apporter et  $doseNmax$  la quantité maximale. Les paramètres  $n$  et  $RatioN$  (ainsi que  $doseNmin$  et  $doseNmax$ ) sont donc susceptibles de modifier les calendriers de fertilisation obtenus. Afin de choisir le calendrier optimale (et donc de jouer sur les paramètres  $n$  et  $RatioN$ ), une procédure d'optimisation multicritère pondérée est mise en place : parmi les calendriers générés lorsque  $n$  et  $RatioN$  varient, on choisit celui qui minimise le critère suivant :

$$\text{Critère} = a \sum_1^{365} \frac{(\text{lixiviation}_{\text{observée}} - \text{lixiviation}_{\text{idéale}})^2}{\max(\text{lixiviation}_{\text{observée}})^2} + b \sum_1^{365} \frac{(\text{Demande} - \text{absorption}_{\text{observée}})^2}{\max(\text{Demande})^2}$$

avec  $\text{lixiviation}_{\text{observée}}$  et  $\text{absorption}_{\text{observée}}$  la lixiviation et l'absorption d'azote calculées par le modèle et  $\text{lixiviation}_{\text{idéale}}=0$ . Le premier terme de la somme représente la contrainte environnementale tandis que le second traduit l'objectif de satisfaction des besoins de la plante. Les paramètres  $a$  et  $b$  traduisent l'importance variable accordée à la protection de l'environnement ou à la production, avec  $a+b=1$ .

<sup>3</sup> Voir <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>

## Conclusions et Perspectives

Epistics a largement été conçu pour fonctionner "en mode inverse" c'est à dire pour produire des calendriers de fertilisation et d'irrigation. Ces calendriers, une fois confrontés à ceux réalisés par les producteurs devraient servir de base à des enquêtes sur les déterminants des pratiques des producteurs. Auparavant, le modèle doit être évalué à l'aide de données observées sur les teneurs en eau et en azote du sol en verger de pommier. Une analyse de sensibilité doit également être menée. Il est prévu que celle ci soit réalisée à l'aide de la boîte à outil "modèles de culture" en construction à l'Inra de Toulouse et devrait être facilitée par le fait qu'Epistics présente des structures de fichiers très proches de celles du modèle Stics duquel il dérive.

*Merci à Françoise Lescourret pour sa relecture attentive.*

## Références Bibliographiques

- Allen R. G., Smith M., Pereira L. S., Pruitt W. O.** 1997. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. *Acta Horticulturae* 449 (1) pp. 17-33.
- Bellon S., Lescourret F., Calmet J. P.** 2001. Characterisation of apple orchard management systems in a French Mediterranean Vulnerable Zone. *Agronomie* 21 pp. 200-213.
- Bockstaller C., Girardin P., van der Werf H. M. G.** 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European journal of Agronomy* 7 (3) pp. 261-270.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Baret F., Antonioletti R., Durr 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. 1 : theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18 pp. 311-346.
- Génard M., Huguet J.-G.** 1999. Modelling the effect of water supply on peach growth and sugar content. *Fruits* 54 (3) pp. 191-196.
- Habib R.** 1984. La formation des réserves azotées chez les arbres fruitiers. Revue bibliographique. *Fruits* 39 (10) pp. 623-635.
- Habib R., Monestiez P.** 1987. Modélisation de la dynamique de répartition de l'azote chez un jeune arbre fruitier pendant la phase de croissance exponentielle. 1. Etablissement du modèle, estimation des paramètres. *Agronomie* 7 (6) pp. 401-408.
- Hug F.** 2002. Effets du fractionnement de la fertilisation azotée sur la croissance et la fructification du pommier (cv Golden) et sur l'environnement. Thèse Type Thesis, Université d'Angers, Angers, 71 pp.
- Munoz N., Guerri J., Legaz F., Primo-Millo E.** 1993. Seasonal uptake of <sup>15</sup>N-nitrate and distribution of absorbed nitrogen in peach trees. *Plant and Soil* 150 (1) pp. 263-269.
- Rufat J., DeJong T. M.** 2001. Estimating seasonal nitrogen dynamics in peach trees in response to nitrogen availability. *Tree Physiol.* 21 (15) pp. 1133-1140.
- Vaysse P., Reynier P., Lacroix Raynal C., Freixinos E., Soing P.** 2000. Nutrition du pommier : chronologie des consommations. *Infos-Ctifl* 165 pp. 30-32.
- Weinbaum S. A., Johnson R. S., DeJong T. M.** 1992. Causes and consequences of overfertilization in orchards. *HortTechnology* 2 (1) pp. 112-121.

## Analyse de sensibilité de STICS : principe et résultats

F. Ruget, R. Faivre, N. Brisson, R. Delécolle

Nous avons bâti une analyse de sensibilité assez globale de STICS, qui puisse orienter le chercheur dans le choix des paramètres à étudier plus particulièrement lors d'utilisations nouvelles du modèle.

Elle a été réalisée pour maïs et blé, donc pour les principales fonctions des cultures annuelles à grains, ce qui permet d'identifier des comportements de cultures d'hiver et d'été, mais ne permet pas d'étudier les paramètres des modules de mise à fruits des cultures à fructification étalée dans le temps. Cette analyse est orientée vers l'étude des variables liées à la production agricole d'une parcelle, en s'intéressant particulièrement aux résultats finaux et non à l'évolution des variables d'état au cours de la culture : quels paramètres doivent être bien estimés pour que le modèle fournisse de bonnes estimations de production parcellaire, de son coût en eau et des risques associés ?

Pour les besoins de l'étude, on a isolé 9 modules principaux : développement, mise en place d'indice foliaire, interception, conversion, partition vers les grains, mise en place des racines, bilan hydrique, minéralisation de l'azote organique du sol, absorption d'azote par la plante.

Dans chaque module, plusieurs paramètres ont été étudiés pour voir s'il existe des interactions entre eux d'une part, les classer selon leur influence puis choisir le plus influent de chaque module pour le représenter d'autre part.

Le choix de travailler à la maille élémentaire du modèle, c'est-à-dire à la parcelle, a justifié en grande partie le choix des paramètres étudiés : ce sont principalement des paramètres plante. Quelques paramètres de sol et de techniques ont été ajoutés lorsqu'ils sont difficiles à renseigner et peuvent néanmoins être influents. Aucun paramètre considéré comme général (par exemple les paramètres de minéralisation) n'a été étudié. De même, l'effet du climat n'a pas été étudié en tant que tel, parti a été pris de considérer que les données météorologiques sont correctes. L'effet des incertitudes sur les grandeurs météorologiques découlant de l'attribution d'un seul poste à l'ensemble d'une région n'a donc pas été analysé.

Les variations des paramètres doivent faire l'objet d'une logique identifiée, puisque d'elles dépend l'influence qui sera attribuée aux paramètres, et en particulier son classement par rapport aux autres paramètres. On choisit généralement les extrêmes des gammes rencontrées soit dans des expérimentations (durées des phases de développement), soit dans la bibliographie (évaporation du sol humide avant diminution par rapport à l'évaporation potentielle), c'est-à-dire l'incertitude présumée de ces valeurs.

Les sorties dont on a étudié les variations sous l'influence des paramètres sont d'une part les sorties des modules eux-mêmes (généralement, le terme d'échange entre les modules) pour l'analyse intra module, soit les sorties production, consommation et drainage d'eau, lessivage d'azote pour l'étude globale.

On appelle conditions, l'ensemble des conditions de la culture, c'est-à-dire le sol et les apports d'eau et d'azote ainsi que le climat de la culture, conditions dont on traite l'effet comme celui de facteurs, c'est-à-dire de causes non chiffrées.

Les méthodes employées sont l'analyse de variance et la régression multiple quadratique.

Les analyses de variance ont pour but de montrer l'influence relative des différentes sources de variation sur les sorties, et en particulier de situer l'influence relative des conditions de culture et des paramètres du modèle dans les variations observées des sorties.

La régression permet de quantifier les influences de chacun des paramètres, leurs interactions, d'identifier la présence d'effets non linéaires. Elle est appliquée à l'étude interne des modules (étude intra module), puis à la comparaison des sensibilités des différents modules (étude inter module) représentés par un seul paramètre et séparés en deux groupes (fonctionnement aérien et souterrain). Finalement, sont définies et comparées les sensibilités, c'est-à-dire les variations relatives des sorties.

Les résultats sont présentés en 3 parties : l'influence relative des conditions de culture et des paramètres, l'analyse de la sensibilité interne des modules et l'analyse de la sensibilité des différents modules.

a. conditions-paramètres

L'importance relative des conditions et paramètres illustre la plus ou moins forte dépendance de chaque module par rapport au milieu ou par rapport à ses propres paramètres. Les modules sensibles aux paramètres (indice foliaire, interception, enracinement et minéralisation) sont ceux dont la sortie dépend principalement des paramètres, avec des situations différentes selon les modules. Les modules sensibles au milieu (développement, conversion, partition, bilan hydrique, absorption) sont ceux par les quels agissent principalement les facteurs du milieu. Ils ont pour la plupart des lois assez bien connues et des paramètres assez bien définis.

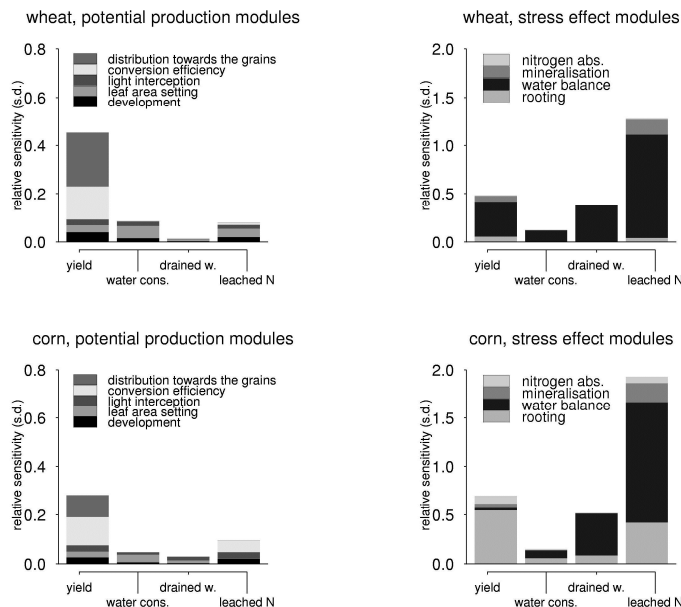
Les interactions entre conditions et paramètres peuvent atteindre 25 % et la moitié dépassent 15 % de variance expliquée, ce qui attire l'attention sur la nécessité de ne pas traiter l'effet des paramètres indépendamment des conditions. Les effets quadratiques sont rares, ils paraissent faibles, mais ne sont pas négligeables pour autant.

b. analyse intramodule

Plusieurs paramètres sont d'importance équivalente dans les modules dits indice foliaire et enracinement, c'est-à-dire ceux qui concernent la mise en place des organes aériens et souterrains, ainsi que dans les modules, surtout sensibles au milieu, de conversion du rayonnement intercepté en matière sèche et de bilan hydrique. Dans ces cas-là, il y a généralement interaction entre les paramètres sauf si ces paramètres agissent à des périodes différentes dans le temps (conversion aux différents stades). Les autres modules ont un paramètre prépondérant (seul ou parmi 2, partition, développement, minéralisation, absorption d'azote).

Cette analyse permet le classement des paramètres et la sélection du plus important pour la sortie choisie, pour représenter le module dans l'étude intermodule.

c. analyse intermodule



Les sensibilités relatives comparées aux variations relatives des paramètres montrent que malgré les différences de variabilité imposées aux paramètres, les modules influents ressortent nettement : pour le rendement, la plupart des modules sont importants, pour les consommations et drainage d'eau, c'est surtout le paramètre représentant le bilan hydrique (à savoir la capacité au champ) qui est prépondérante, pour le lessivage d'azote, c'est aussi ce paramètre qui est essentiel, parmi ceux étudiés, mais il a une influence près de 3 fois plus forte sur l'azote lessivé que sur l'eau drainée. Leurs participations à la variation globale de chacune des 4 sorties choisies sont présentées (figure). Il apparaît une forte sensibilité du rendement essentiellement aux modules de conversion et partition, et une très forte sensibilité de l'azote lessivé aux modules du fonctionnement souterrain et en particulier de bilan hydrique (capacité au champ).

Cependant, même dans le cadre restreint des cultures annuelles à grains et des fonctions associées à leur production, certains aspects n'ont pas pu être observés, comme les interactions entre modules, et en particulier entre durées de phases et paramètres agissant pendant cette phase. La sensibilité de la minéralisation au seul paramètre de profondeur d'humification (qui se traduit par une quantité de matière organique présente), est relativement inquiétante car elle a pour conséquence une très faible sensibilité de la minéralisation à quelque facteur que ce soit.

L'analyse simultanée de la sensibilité d'une culture d'hiver et d'une culture d'été montre que la plupart des fonctions ont des sensibilités analogues. drainage et lessivage dépendent plus des paramètres plante pour les cultures que pour les cultures d'hiver où ils dépendent surtout des conditions climatiques.

En conclusion, cette étude permet seulement de donner un panorama général de la sensibilité des principales sorties de production du modèle, pour raisonner des adaptations à d'autres plantes voisines. Comme certaines fonctions telles que les mises en réserve provisoires, les redémarrages après coupe pour les fourrages, l'effet du choix des conditions initiales, en cas de culture pérenne ou plantée, ne sont pas traitées, cette étude ne fournit pas de guide pour adapter le modèle à des cultures pérennes, plantées, à fructification étalée dans le temps ou à mise en réserve autre que dans les grains.

### **Références bibliographiques**

Ce travail est le résumé de l'article

Ruget F., Brisson, N., Delécolle R., Faivre R., 2002. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie*, 22, 133-158.

qui s'appuie en partie sur les mémoires suivants

Samson Eva, 1998. Analyse de sensibilité du modèle de simulation STICS-prairie. IUT Vannes (Statistique et traitement informatique des données), 46 p.+annexes, juin 1998.

Grosbuis Pascal, 1998. Analyse de sensibilité d'un modèle de prédiction de rendement. Ingénierie mathématique, ENSA Rennes, 100 p., septembre 1998.

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.

## Estimation des paramètres des modèles de culture

Wallach D., Charron M.H  
INRA, Agronomie Toulouse

### 1 6 Introduction

Les modèles de culture sont des outils importants de la recherche agronomique. En effet, ceux-ci permettent de tester rapidement et à moindre coût les effets de différentes interventions sur les variables de sortie, telles que le rendement, la biomasse, etc.

Un modèle de culture a deux constituants essentiels : les équations qui le composent et les paramètres qui entrent dans ces équations. Les valeurs de ces paramètres sont primordiales, afin d'avoir des prédictions aussi précises que possibles.

Ces modèles présentent plusieurs caractéristiques, qui rendent l'estimation de leurs paramètres difficile. Tout d'abord, ils comportent un grand nombre de paramètres (environ 200 paramètres dans le modèle STICS). Mais peu de données sont en général disponibles pour les estimer. Il est donc souvent impossible d'estimer tous les paramètres du modèle à partir de la seule information contenue dans les données. Même si l'estimation était numériquement faisable, il est bien connu qu'estimer trop de paramètres par rapport au nombre de données résulte en un modèle dont la qualité de prédiction est médiocre. Puis, la structure des données est souvent complexe. En effet, plusieurs variables peuvent être mesurées (par exemple, rendement, biomasse, indice de surface foliaire, etc.) sur une même parcelle. De plus, ces mesures sont effectuées à plusieurs dates au cours de la saison. Les données disponibles ne sont donc pas indépendantes et il faut tenir compte de cette corrélation dans la procédure d'estimation des paramètres.

Par ailleurs, de l'information a priori est disponible sur les valeurs des paramètres (littérature, experts, etc.). L'utilisation de cette information dans la procédure d'estimation peut contribuer à l'amélioration de la qualité des estimateurs.

De nombreuses méthodes statistiques ont été proposées pour l'estimation des paramètres de modèles relativement simples. Une vaste littérature existe, par exemple, sur les problèmes de choix de modèles en régression linéaire. Les méthodes bayésiennes ont été également très étudiées, ainsi que les régressions sur composantes principales ou des moindres carrés partiels. Par contre, seules quelques études ont été réalisées sur le problème de l'estimation des paramètres des modèles mécanistes. Dans chaque étude, une seule méthode est considérée. Par exemple, Harmon & Challenor (1999) appliquent l'algorithme de Metropolis-Hastings pour estimer les paramètres d'un modèle hydrologique. Wallach et al. (2001) utilisent la validation croisée pour estimer les paramètres d'un modèle de culture.

L'objectif de ce travail est la comparaison de plusieurs méthodes d'estimation des paramètres des modèles de culture, afin de tirer des conclusions sur les avantages et les inconvénients de chaque méthode, et de faire des recommandations aux utilisateurs de ces modèles.

Pour comparer les différentes méthodes statistiques considérées, nous faisons des études de simulation. Nous supposons des vraies valeurs des paramètres, une distribution de probabilité des variables explicatives (pour représenter la gamme de situations dans laquelle le modèle sera utilisé) et une distribution de probabilité des erreurs entre les vraies réponses du système modélisé et les réponses calculées par le modèle. Sous ces hypothèses, un échantillon de données (échantillon d'apprentissage) est généré, sur lequel les paramètres sont estimés selon chaque méthode considérée. D'autres échantillons (échantillons tests) sont générés pour évaluer la qualité de prédiction des différents modèles obtenus. Le fait de travailler par simulation plutôt que sur des données réelles présente plusieurs avantages. Tout d'abord, les vraies valeurs des paramètres sont connues. Il est donc possible de les comparer aux valeurs estimées. Ensuite, nous pouvons générer des échantillons nécessaires pour évaluer les erreurs de prédiction des modèles ajustés. Ces erreurs de prédiction se décomposent en deux parties : d'une part, les erreurs dans l'estimation des paramètres, et d'autre

part, les erreurs entre les réponses observées et les réponses prédites par le modèle. Pour chaque réponse du modèle, cette dernière partie (systématique) est égale à la variance résiduelle. Puisque nous supposons la distribution des erreurs, nous connaissons cette variance et nous pouvons donc évaluer la partie due aux erreurs dans les estimations des paramètres.

Les simulations présentent néanmoins des inconvénients. Les résultats de chaque étude de simulation peuvent dépendre des hypothèses sous-jacentes et de la situation exacte simulée. Si nous voulons tirer des conclusions générales, nous devons balayer une gamme importante d'hypothèses et de situations. C'est pour cela que nous avons fait des simulations pour deux modèles, trois tailles d'échantillon d'apprentissage et deux vecteurs de valeurs initiales des paramètres. Par conséquent, les temps de calculs sont importants.

## 2.0 Matériel et méthodes

### 2.1.0 Modèle

Le modèle utilisé dans les simulations est une partie du modèle STICS (Brisson et al., 1998), que nous appellerons Mini-STICS. Nous nous sommes limités à une partie du modèle pour des raisons de temps de calcul.

Mini-STICS simule le développement du tournesol sur une période de 20 jours, à partir du stade Accélération Maximale de la croissance Foliaire (AMF). Il est supposé qu'il n'y a pas de stress azoté et que le sol est composé de deux couches : la première couche va de 0 à 30 cm et la seconde de 30 cm à la profondeur du sol. Le modèle a quatre variables d'état : l'indice de surface foliaire, noté  $LAI$ , l'humidité relative des 2 couches, respectivement notées  $HUR_1$  et  $HUR_2$ , et la profondeur du front racinaire, notée  $ZRAC$ . Le vecteur des variables explicatives a 75 éléments. Il comprend des caractéristiques du sol, des variables climatiques journalières, des interventions techniques et des conditions initiales. Le modèle a 14 paramètres. Les valeurs des paramètres sont celles suggérées par Guiloufi (1999).

Pour faire des simulations, il faut définir, en plus du modèle à tester, la différence entre ce modèle et les vraies réponses du système. Nous considérons quatre réponses, qui sont  $y_1=LAI$  au jour 10,  $y_2=LAI$  au jour 20,  $y_3=HUR_1+HUR_2$  au jour 10 et  $y_4=HUR_1+HUR_2$  au jour 20. On note  $y=(y_1, y_2, y_3, y_4)$  le vecteur des 4 réponses. On suppose que

$$y_j = f_j(X, \theta) + \varepsilon_j, j=1 \text{ à } 4, \quad (1)$$

où  $X$  est le vecteur (de longueur 75) des variables explicatives,  $\theta$  est le vecteur (de longueur 14) des paramètres,  $f_j(X, \theta)$  est la valeur de la réponse  $j$  calculée par le modèle Mini-STICS et  $\varepsilon_j$ , terme d'erreur du modèle, est une variable aléatoire. Le vecteur  $\varepsilon=(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4)$  est de distribution  $N(0, \Sigma)$ , où  $\Sigma$  est la matrice (4×4) de variance covariance supposée constante. Le vecteur aléatoire  $\varepsilon$  décrit la partie du système qui n'est pas décrite par le modèle.

### 2.2.0 Données

Pour réaliser les simulations, nous devons générer des valeurs pour les 4 réponses selon le modèle (1). Pour cela, des valeurs de  $X$  et de  $\varepsilon$  sont nécessaires. Pour représenter une gamme de conditions agronomiques, on traite les variables explicatives comme des variables aléatoires. Leur distribution, notée  $d$ , correspond à la distribution des conditions.

Pour générer les réponses d'un individu, un vecteur de variables explicatives  $X$  est généré selon la loi  $d$ . Puis, les 4 réponses du modèle sont calculées à l'aide de ce vecteur  $X$  et du vecteur  $\theta$ . Un vecteur  $\varepsilon$  est ensuite généré selon la loi décrite ci-dessus et ajouté aux réponses calculées précédemment. Les vecteurs  $\varepsilon$  générés pour différents individus sont indépendants et identiquement distribués. L'hypothèse de distribution identique signifie que les mêmes variables sont mesurées aux mêmes dates pour tous les individus de l'échantillon. Cette hypothèse est très forte.

Pour l'échantillon d'apprentissage, la distribution de  $X$  est indexée  $d=0$  et appelée distribution d'apprentissage. Cette distribution correspond à peu près à la gamme de conditions de la région d'Auzeville.

On souhaite tester le modèle ajusté sur l'échantillon d'apprentissage non seulement pour des conditions similaires à celles de cet échantillon, mais aussi pour des conditions différentes. D'autres distributions, appelées distributions d'extrapolation, ont été définies pour les variables explicatives. On considère 5 distributions d'extrapolation,  $d=1 \dots 5$ . Les distributions d'extrapolation 1, 2, 3 et 4 ont, en moyenne, respectivement des sols moins profonds, des sols plus limoneux, des densités de semis plus faibles et un temps plus sec que la distribution d'apprentissage. La distribution d'extrapolation 5 combine toutes ces différences par rapport à la distribution d'apprentissage.

### 2.3.3 Information a priori

Les méthodes considérées utilisent deux types d'information sur les paramètres. C'est pourquoi, nous considérons deux types d'information a priori. La première correspond à une estimation a priori des valeurs des paramètres (valeurs a priori) et la seconde à une distribution de probabilité a priori.

Deux vecteurs de valeurs a priori sont utilisés. Si l'on mesure la distance entre le vecteur des vraies valeurs  $\theta^0$  et le vecteur de valeurs initiales  $\theta^1$  par  $\sum_{j=1}^{14} |(\theta_j^0 - \theta_j^1)/\theta_j^0|$ , alors les valeurs initiales 1 sont plus proche des vraies valeurs.

Une loi a priori est définie autour de chacun de ces vecteurs.

### 2.4 Méthodes statistiques d'estimation des paramètres

Toute approche considérée pour l'estimation des paramètres doit tenir compte des caractéristiques du problème décrites en introduction. Trois approches semblent convenir. La première approche, choix de modèle, consiste à choisir un petit nombre de paramètres à estimer. Les méthodes bayésiennes combinent l'information a priori sur les paramètres et l'information contenue dans les données pour estimer tous les paramètres. La dernière approche, la régression ridge, est une méthode intermédiaire, dans le sens où elle peut être justifiée soit par des arguments fréquentistes, soit par des arguments bayésiens. Tous les paramètres peuvent être estimés grâce à l'utilisation de l'information a priori.

Les méthodes de choix de modèle choisissent le nombre de paramètres à estimer à partir de l'échantillon d'apprentissage. Ces méthodes ont largement été étudiées dans le cadre de la régression linéaire. Pour un modèle linéaire, le choix de modèle est en fait un choix des variables explicatives à inclure dans le modèle. Les paramètres des variables non incluses dans le modèle final sont mis à zéro. Pour les modèles de culture, cela n'a pas de sens de mettre les paramètres à zéro. C'est pourquoi, les paramètres non sélectionnés gardent leur valeur a priori.

Plusieurs méthodes de choix de modèle ont été proposées dans la littérature : le Critère d'Information d'Akaike  $AIC$  (Akaike, 1972), le Critère d'Information de Schwarz  $BIC$  (Schwarz, 1978) ainsi que des versions de  $AIC$  et  $BIC$  corrigées pour petits échantillons,  $AIC_C$  (Hurvich & Tsai, 1989) et  $BIC_C$  (McQuarrie, 1999). Toutes ces méthodes sont des méthodes de vraisemblance pénalisée. La pénalisation est une fonction du nombre de paramètres estimés. Par exemple, pour  $AIC$ , cette pénalisation est égale à  $2p$  et pour  $BIC$ , elle est égale à  $p \log(n)$ , où  $n$  est le nombre de données. La validation croisée  $CV$  (Stone, 1974) peut être également utilisée comme méthode de choix de modèle. Le  $C_p$  de Mallows (Mallows, 1973) est également une méthode de choix de modèle. Mais elle suppose que l'on peut estimer tous les paramètres du modèle, ce qui n'est pas notre cas.

En principe, avec  $p$  paramètres,  $2^p$  ensembles de paramètres sont possibles, soit environ 16000 combinaisons pour notre modèle. Pour réduire le nombre de combinaisons à tester, nous faisons une régression ascendante. Tout d'abord, le meilleur modèle (au sens de la somme quadratique résiduelle minimale) à un paramètre est sélectionné. Puis, les modèles à deux paramètres sont testés, sachant que l'un des deux paramètres est celui sélectionné à l'étape 1. Le meilleur modèle est sélectionné



Une méthode de choix de modèle est utilisée pour décider combien de paramètres estimer. A chaque étape de la régression ascendante, les paramètres sont estimés par la méthode des moindres carrés généralisés itérés.

La régression ridge (Hoerl & Kennard, 1970) a été proposée pour résoudre les problèmes de mauvais conditionnement (variables explicatives colinéaires) en régression linéaire. De telles situations aboutissent à de grandes variances des estimateurs. Cette variance élevée peut entraîner des estimations aberrantes. Les estimateurs obtenus sont biaisés mais de variance plus faible que les estimateurs des moindres carrés.

Comme les méthodes de choix de modèle, la régression ridge est une méthode de vraisemblance pénalisée. Le critère minimisé est une pondération entre le critère des moindres carrés généralisés et la pénalisation, qui est maintenant une fonction de l'écart quadratique entre le vecteur des valeurs initiales des paramètres et le vecteur des valeurs estimées.

Dans les méthodes bayésiennes, on suppose une distribution jointe a priori sur le couple  $(\theta, \Sigma)$ . La distribution jointe a posteriori est donnée par le théorème de Bayes. Cette distribution contient toute l'information disponible sur le couple  $(\theta, \Sigma)$ .

## 2.5 Critères de comparaison des méthodes

Pour décider si une méthode d'estimation est plus satisfaisante que les autres, nous devons définir des critères de comparaison. Les modèles de culture sont utilisés de multiples façons. Il est donc difficile de définir un seul critère de comparaison.

La principale utilisation de ces modèles est la prédiction. Il est donc important d'avoir des critères qui jugent de la qualité de prédiction des modèles obtenus avec les différentes méthodes d'estimation. L'Erreur Quadratique Moyenne de Prédiction (sigle anglo-saxon *MSEP*) est le critère classiquement utilisé pour mesurer la qualité de prédiction.

En régression, il est classique de prédire la (ou les) réponse(s) en supposant que les variables explicatives suivent la même loi que celle de l'échantillon d'apprentissage. Mais, pour les modèles de culture, les prédictions sont souvent réalisées pour des variables explicatives correspondant à une distribution différente. Il est également habituel en régression de prédire uniquement la (ou les) réponse(s) utilisée(s) pour l'estimation des paramètres. Les modèles de culture simulent d'autres variables que celles utilisées lors de l'estimation. Il peut être intéressant de prédire également ces réponses. Ainsi, pour chaque modèle, plusieurs qualités de prédiction sont importantes (une pour chaque distribution de variables explicatives et chaque réponse prédite).

Pour la réponse  $j$  ( $j=1 \dots 4$ ), la distribution  $d$  des variables explicatives ( $d=0 \dots 5$ ) et la méthode d'estimation  $m$ , *MSEP* est définie par

$$MSEP_j^d(m) = E \left[ \left( f_j(X^{*d}, \theta^0) + \varepsilon_j^* - f_j(X^{*d}, \hat{\theta}(m)) \right)^2 \right],$$

où  $\hat{\theta}(m)$  est le vecteur des estimateurs obtenu avec la méthode  $m$ . La notation \* indique que les variables aléatoires  $X^d$  et  $\varepsilon_j^*$  sont indépendantes de celles de l'échantillon d'apprentissage. L'espérance est prise sur toutes les quantités aléatoires, à savoir  $\hat{\theta}(m)$ ,  $X^d$  et  $\varepsilon_j^*$ .

A partir de la définition de  $MSEP_j^d(m)$ , on voit que, en l'absence de toute erreur dans les estimateurs des paramètres, c'est à dire  $\hat{\theta}(m) = \theta^0$ , on a  $MSEP_j^d(m) = \text{Var}[\varepsilon_j^*] = \sigma_j^2$ . La valeur minimale de  $MSEP_j^d(m)$  est donc  $\sigma_j^2$ ,  $j=1 \dots 4$ .

Dans les simulations,  $MSEP_j^d(m)$  est estimée par

$$MSEP_j^d(m) = \frac{1}{80} \sum_{k=1}^{80} \frac{1}{1000} \sum_{l=1}^{1000} \left[ f_j(X_l^{*d}, \theta^0) + \varepsilon_{lj}^* - f_j(X_l^{*d}, \hat{\theta}_k(m)) \right]^2$$

La première somme, indexée par  $k$ , correspond à différents échantillons d'apprentissage (et donc à différents vecteurs  $\hat{\theta}(m)$ ) et la seconde, indexée par  $l$ , à différents tirages de  $X^{d^*}$  et  $\varepsilon_j^*$ .

La qualité des estimateurs des paramètres est également importante. D'une part, ceux-ci ont une signification physique ou biologique. D'autre part, la qualité des estimateurs détermine la qualité de prédiction des modèles. Pour chaque paramètre du modèle, l'Erreur Quadratique Moyenne ( $EQM$ ) mesure l'écart quadratique entre la vraie valeur et la valeur estimée du paramètre

$$EQM_j(m) = E \left[ \left( \theta_j^0 - \hat{\theta}_j(m) \right)^2 \right], j = 1 \text{ à } 14.$$

L'espérance est prise sur  $\hat{\theta}_j(m)$ .

Dans les simulations,  $EQM$  est estimée par

$$EQM_j(m) = \frac{1}{80} \sum_{k=1}^{80} \left( \theta_j^0 - \hat{\theta}_{kj}(m) \right)^2, j = 1 \text{ à } 14.$$

### 3 ó Résultats

Dans une première étape, nous avons comparé les méthodes de choix de modèle présentées dans la section 2.4. Pour faire cette comparaison, la seule réponse considérée, à la fois pour estimer les paramètres et pour tester les modèles ajustés, était  $LAI_{20}$  ( $j=2$ ).

Le tableau I présente les valeurs moyennes (sur 80 échantillons) de  $MSEP_2$  pour les différentes méthodes de choix de modèle.

Tableau I : Estimation de  $MSEP_2$  des modèles obtenus avec les méthodes de choix de modèle.

	$MSEP_2^{d=0}$	$MSEP_2^{d=1}$	$MSEP_2^{d=2}$	$MSEP_2^{d=3}$	$MSEP_2^{d=4}$	$MSEP_2^{d=5}$
Initiale	0.63	0.47	0.69	0.65	0.50	0.40
AIC	0.44	0.40	0.47	1.31	0.41	0.63
AIC <sub>C</sub>	0.42	0.38	0.44	0.90	0.40	0.50
BIC	0.42	0.39	0.45	0.97	0.40	0.53
BIC <sub>C</sub>	0.41	0.38	0.43	<b>0.87</b>	0.39	0.50
CV	0.44	0.41	0.47	0.96	0.42	0.56
$BIC_C^B$	0.39	0.38	0.40	<b>0.44</b>	0.39	0.39
Minimale	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36

Quelle que soit la distribution des variables explicatives,  $BIC_C^B$  donne la meilleure qualité de prédiction.

On remarque que, excepté pour  $BIC_C^B$ , les valeurs de  $MSEP_2^{d=3}$  et  $MSEP_2^{d=5}$  sont supérieures à la valeur initiale. Si l'on regarde en détail, et non pas en moyenne, les résultats obtenus pour ces deux distributions, les erreurs de prédiction de certains échantillons sont très élevées (résultats non montrés ici). Pour ces échantillons, on remarque de fortes corrélations entre les estimateurs des paramètres, ce qui entraîne des estimations très éloignées des vraies valeurs des paramètres. Les bornes imposées aux paramètres dans la méthode  $BIC_C^B$  permettent de réduire les erreurs de prédiction par rapport à  $BIC$  : la valeur de  $MSEP_2^{d=3}$  a, par exemple, été divisée par deux ( $0.87 \rightarrow 0.44$ ).

Le nombre de paramètres sélectionnés varie de 1 à 2 pour  $BIC_C^B$  et de 1 à 7 pour  $CV$ . Harrel (page 61, 2001) propose d'estimer entre  $n/20$  et  $n/10$  paramètres. Dans notre cas avec  $n=14$ , cela indique qu'il faudrait estimer de 1 à 2 paramètres. Par ailleurs, avec des simulations, il est possible de connaître, pour chaque échantillon d'apprentissage, le nombre de paramètres à estimer pour que  $MSEP_2^{d=0}(m)$  soit minimale. Ce nombre varie de 1 à 3. Le nombre de paramètres sélectionnés par

$BIC_C^B$  est donc comparable non seulement au nombre conseillé dans la littérature, mais aussi au nombre optimal, tandis que d'autres méthodes, en particulier CV, semblent sélectionner trop de paramètres.

Les paramètres les plus fréquemment sélectionnés par  $BIC_C^B$  sont *ADENS* (Paramètre de compensation entre le nombre de tiges et la densité de plantes), *TCMIN* (Température minimale de croissance), *DLAIMAX* (Vitesse maximale de croissance foliaire) et *BDENS* (Densité minimale au-dessus de laquelle il y a compétition entre les plantes pour la croissance foliaire). Ces paramètres sont tous directement liés à la croissance foliaire.

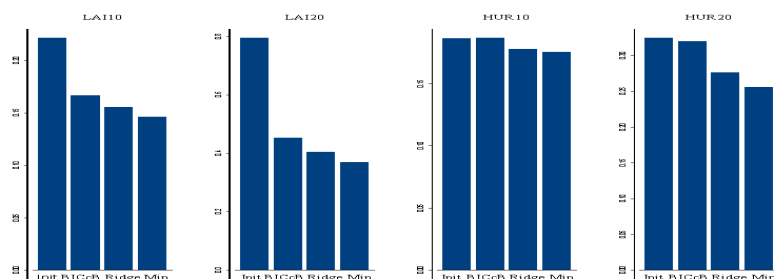
Des simulations ont été réalisées pour d'autres tailles d'échantillon  $n$  et pour un autre modèle. Les résultats obtenus pour ces simulations indiquent également que  $BIC_C^B$  est la méthode de choix de modèle la plus adaptée aux modèles de culture.

Dans une deuxième phase, la meilleure méthode de choix de modèle ( $BIC_C^B$ ) a été comparée à la régression ridge, en considérant les quatre réponses du modèle (1) et  $n=14$ .

$BIC_C^B$  sélectionne encore entre 1 et 2 paramètres. L'augmentation des données à 4 réponses par individu, au lieu d'une seule, n'a pas entraîné d'augmentation du nombre de paramètres sélectionnés. Les paramètres les plus sélectionnés sont maintenant *TCMIN*, *ADENS*, *DLAIMAX* et *KMAX* (Coefficient cultural maximal de la culture). Le paramètre *KMAX*, qui n'était sélectionné que pour 1 échantillon dans le cas du modèle *LAI<sub>20</sub>*, est ici sélectionné 9 fois. *KMAX* est en fait le paramètre auquel la réponse HUR est la plus sensible. Les mesures de HUR, désormais utilisées pour estimer les paramètres, permettent de l'estimer.

Le graphique I présente les valeurs de  $MSEP_j^{d=0}(m)$ . En partant de la gauche, les barres représentent la valeur de *MSEP* calculée avec les paramètres fixés à leur valeur initiale (avant toute estimation), les valeurs pour les méthodes  $BIC_C^B$  et *Ridge* et la valeur minimale de *MSEP* ( $\sigma_j^2$ ).

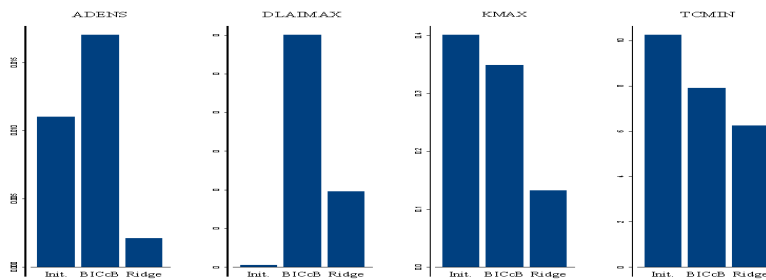
Graphique I : Valeurs de *MSEP* des modèles obtenus avec les méthodes  $BIC_C$  et ridge pour la distribution d'apprentissage



Quelle que soit la réponse considérée,  $MSEP_j^{d=0}(m=ridge)$  est inférieure à  $MSEP_j^{d=0}(m=BIC_C)$ . Il en est de même pour des prédictions réalisées pour les autres distributions des variables explicatives,  $d=1i-5$  (résultats non présentés ici).

Dans le graphique II, les barres représentent les *EQM* des quatre paramètres les plus souvent sélectionnés par  $BIC_C^B$ . La première barre correspond à la valeur de la différence quadratique entre la vraie valeur et la valeur initiale (*EQM* initiale).

Graphique II : Erreurs Quadratiques Moyennes des paramètres *ADENS*, *DLAIMAX*, *KMAX* et *TCMIN*



Pour les quatre paramètres, les  $EQM$  des paramètres estimés par la méthode ridge sont inférieures à celles des paramètres obtenus avec  $BIC_C^B$ . Alors que les qualités de prédiction des modèles ajustés par les deux méthodes sont peu différentes, les  $EQM$  sont elles assez différentes. On remarque pour le paramètre  $DLAIMAX$ , dont la valeur initiale est proche de la vraie valeur, que l'estimation est moins bien que cette valeur initiale.

Une analyse plus approfondie permet de comprendre pourquoi les résultats obtenus par  $BIC_C^B$  sont moins bons que ceux obtenus avec ridge. Tout d'abord,  $BIC_C^B$  ne sélectionne qu'un petit nombre de paramètres. Les estimateurs de ces paramètres compensent les erreurs dans les autres paramètres, qui conservent leur valeur initiale. D'autre part, en regardant les résultats échantillon par échantillon, on remarque que, pour quelques échantillons, les valeurs estimées sont égales à l'une des bornes de l'intervalle de variation imposé. Cela est encore dû à des problèmes de corrélation des estimateurs.

#### 4.6 Conclusions

Le but de ce travail est de proposer une méthode d'estimation des paramètres des modèles de culture. Nous avons pu voir l'importance de la qualité des estimateurs : des estimations très éloignées des vraies valeurs peuvent aboutir à de fortes erreurs de prédiction pour des distributions des variables explicatives différentes de celle de l'échantillon d'apprentissage.

Parmi les méthodes de choix de modèles comparées,  $BIC_C^B$  s'est avérée la meilleure. Ces résultats ont été confirmés pour deux modèles très différents et plusieurs tailles d'échantillon d'apprentissage. Par contre, nous avons peu exploré l'effet des valeurs initiales et des bornes utilisées pour contraindre l'estimation avec  $BIC_C^B$ .

Le nombre de paramètres sélectionnés par  $BIC_C^B$  est faible et comparable au nombre optimal, ce qui souligne l'importance d'estimer, avec les méthodes de choix de modèle, peu de paramètres pour éviter de dégrader la qualité de prédiction.

La comparaison entre les méthodes  $BIC_C^B$  et ridge nous amène à préférer ridge. En effet, la qualité de prédiction des modèles obtenus avec cette méthode est meilleure, bien que les différences soient peu importantes. En cas de fortes corrélations entre les estimateurs des paramètres, les estimations obtenues avec  $BIC_C^B$  peuvent être très éloignées des vraies valeurs. La régression ridge, en utilisant l'information a priori, permet d'éviter de telles valeurs.

La régression ridge, qui utilise à la fois l'information a priori sur les paramètres et l'information contenue dans les données, peut être vue comme une méthode bayésienne. Mais elle ne fournit que le mode de la distribution a posteriori. Cette méthode étant prometteuse, il serait intéressant de tester des méthodes bayésiennes qui fournissent plus d'information sur la distribution a posteriori des paramètres. En particulier, si on avait un échantillon de cette distribution, on pourrait évaluer les incertitudes dans les prédictions du modèle. La prochaine étape de la thèse sera alors l'application d'algorithmes du type MCMC (Markov Chain Monte Carlo). Ces algorithmes permettent, en effet, de générer un échantillon de la distribution a posteriori, même pour des modèles très complexes.

Une hypothèse importante faite dans ce travail est que les mêmes variables sont mesurées aux mêmes dates pour tous les individus de l'échantillon d'apprentissage. En général, avec des vraies données, soit les variables mesurées ne sont pas du même type, soit les mesures ne sont effectuées aux mêmes dates. La structure de la matrice  $\mathcal{L}$  est bien plus complexe que celle supposée ici. Dans la

suite du travail, il faudra tenir compte de cela pour tester les méthodes, afin de généraliser le comportement des méthodes à des données réelles.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] AKAIKE H. (1972) «Information theory and an extension of the maximum likelihood principle», in Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. Information Theory, Supp. to Problems of Control and Information Theory, 267-281.
- [2] BRISSON N. et al. (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».
- [3] GHILOUFI M. (1999) «Méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures : application au tournesol et à la betterave à sucre », Rapport de DAA, Institut National Agronomique Paris Grignon, 48 pages + annexes.
- [4] HARMON & CHALLENGOR (1999)
- [5] HARREL F.E. (2001) «Regression modelling strategies: with applications to linear models, logistic regression, and survival analysis», Springer-Verlag New York.
- [5] HOERL A.E. & KENNARD R.W. (1970) «Ridge regression : biased estimation for non-orthogonal problems», Technometrics, 12, 55-68.
- [7] HURVICH C.M. & TSAI C.-L. (1989) «Regression and time series model selection in small samples», Biometrika, 76(2), 297-307.
- [8] MALLOWS C.L. (1973) «Somme Comments on  $C_p$ », Technometrics, 15(4), 661-675.
- [9] McQUARRIE A.D. (1999) «A small-sample correction for the Schwarz SIC model selection criterion», Statistics & Probability Letters, 44, 79-86.
- [10] SCHWARZ G. (1978) «Estimating the dimension of a model», The Annals of Statistics, 6(2), 461-464.
- [11] STONE M. (1974) «Cross-validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions», Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 36(2), 111-147.
- [12] W ALLACH (2001) «».

## Session 5

Couplage avec d'autres modèles et  
spatialisation

Animateur : Gérard Dedieu

## Utilisation de données satellitaires couplées à un modèle de fonctionnement pour l'évaluation de la production prairiale à l'échelle nationale

Di Bella<sup>1,3</sup>, C.; Faivre<sup>2</sup>, R.; Ruget<sup>3</sup>, F.; Seguin<sup>3</sup>, B.; Guéris<sup>3</sup>, M.; Combal<sup>3</sup>, B.; Weiss<sup>3</sup>, M. and Rebella<sup>1</sup>, C.

1. Instituto de Clima y Agua ó CIRN óINTA, Los Reseros y Las Cabañas S/N, Castelar (1712), Buenos Aires, Argentina (cdibella@cnia.inta.gov.ar)

2. Biométrie et IA, INRA ó Toulouse, BP 27, 31326 CastanetTolosan Cedex- France

3. CSE, Bâtiment Climat - INRA ó Avignon, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9- France

### RESUME

En France les prairies occupent 21% de la superficie totale, ce qui justifie l'effort pour développer un suivi en temps réel de la production de la biomasse au niveau national. L'absence de méthodes directes de faible coût applicables à des grandes régions conduit à étudier les modèles de simulation du fonctionnement des cultures, comme dans le cas du système ISOP (Information et Suivi Objectif des Praires), et les possibilités offertes par la télédétection pour contribuer à améliorer le diagnostic fourni. Ce travail a eu pour but d'évaluer ces possibilités. Pour cela, treize régions fourragères (FR) de France ont été sélectionnées. Les données du capteur VEGETATION-SPOT4 (1 km<sup>2</sup>) ont été utilisées pour fournir, à partir de modèles de déconvolution, les valeurs de réflectance correspondant à la signature d'une prairie pure. Celle-ci a été mise en relation avec certaines variables de croissance estimées par le modèle STICS-Prairie à l'intérieur du système ISOP. Au-delà du bon accord général entre les deux types de données, l'analyse de ces relations a permis d'établir que celle qui lie les indices de végétation basés sur le moyen infrarouge (SWVI) et l'indice foliaire (LAI) était la plus forte. Les résultats obtenus confirment les capacités des données satellitaires à fournir des estimateurs de variables productives complémentaires de celles estimées à partir de modèles de simulation. En particulier les différences spatiales et temporelles entre les informations fournies par le satellite et les estimations du modèle, surtout pendant les périodes de récolte de biomasse dans les systèmes de production, pourraient contribuer à améliorer les estimations du modèle à l'échelle régionale.

Mots clés : suivi de la végétation, prairies, sécheresse, échelle régionale, télédétection, modèle de simulation, indice de végétation, désagrégation

### INTRODUCTION

Des études scientifiques ont cherché à établir des méthodes précises, économiques et rapides, pour estimer les productions de biomasse, et en particulier celles des prairies. Si les coupes de biomasse constituent une méthode simple à mettre en œuvre (par exemple Sims *et al.* 1978), cette technique est limitée par sa lenteur, son coût, le caractère destructif des mesures, et surtout par le nombre de mesures nécessaires pour produire une estimation fiable, à partir d'un échantillonnage, à l'échelle de la France.

La modélisation de la production des fourrages a depuis longtemps fait l'objet de nombreux travaux de recherche (par exemple Arnold *et al.* 1972). L'INRA a adapté à la prairie le modèle STICS (Simulateur Multidisciplinaire pour les Cultures Standard) (Brisson *et al.* 1998), en ajoutant des modules ou des fonctions spécifiques pour simuler les modes d'exploitation caractéristiques de la prairie et le redémarrage du couvert après coupe. A travers le système ISOP, le SCEES a engagé une convention avec l'unité CSE de l'INRA d'Avignon et le service agrométéorologie de Météo France, pour la construction et la mise en service d'un outil. Celui-ci, à partir d'un modèle alimenté au travers d'un SIG (Système d'Information Géographique) par des enquêtes sur les pratiques culturales, d'informations sur les sols et le climat, permet d'estimer pour chaque région fourragère (RF) la production des prairies et de calculer un indicateur de conjoncture par comparaison à une moyenne sur 16 ans.

La télédétection satellitaire offre des perspectives intéressantes pour compléter les travaux réalisés à partir de modèles de simulation, en tirant parti des informations répétitives et spatialisées fournies par différents capteurs spatiaux. Plusieurs travaux démontrent l'existence de forts rapports entre information satellitaire (principalement obtenue à partir du satellite NOAA-AVHRR) et biomasse ou production primaire nette (PPN) pour différentes régions et écosystèmes du monde (*e.g.* Goward *et al.* 1985 ; Paruelo *et al.* 2000). D'autres études ont cherché à identifier les périodes ou les zones particulièrement sèches (par exemple Seguin 1993). L'intérêt majeur des données de télédétection réside dans la possibilité d'extrapoler des données

acquises à une résolution pixellaire pour obtenir des informations continues spatialement avec un délai et un coût d'acquisition raisonnable.

L'existence du système ISOP et la disponibilité des données du nouveau capteur VEGETATION (lancé en avril 1998 sur la plateforme SPOT-4), dédié à l'observation des couverts végétaux, nous a conduit à explorer les possibilités d'amélioration de l'estimation de la productivité des prairies à l'échelle régionale sur le domaine national, en associant les mesures fournies par la télédétection à l'information obtenue par les modèles de simulation de la croissance des prairies.

## ZONES D'ÉTUDE, OUTILS ET MÉTHODES

Nous avons adopté l'échelle de travail choisie dans le système ISOP, la Région Fourragère (RF), parce qu'elle permet des estimations appliquant à tout le territoire français (Hentgen 1982) (Figure 1).

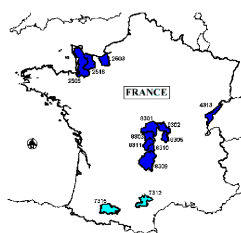


Figure 1 : Zones d'étude

Pour limiter le volume de travail (l'ensemble du territoire est couvert par 200 RFs), nous avons choisi treize RFs les plus représentatives des variabilités climatiques et topographiques qui entraînent de grandes variations de productivité entre régions à l'échelle nationale en France. Une fenêtre de travail a été définie à l'intérieur de chacune des treize RFs (5 x 5 cellules de 1 km<sup>2</sup> chacune).

Pour chaque fenêtre de travail on a obtenu de l'information spectrale correspondant au capteur VEGETATION dans les bandes bleue (B<sub>0</sub>), rouge (B<sub>2</sub>), proche infrarouge (B<sub>3</sub> ou PIR) et moyen infrarouge (B<sub>4</sub> ou MIR) pour la période mars-octobre 1999 et 2000. Cette information, à l'échelle de 1 km<sup>2</sup>, pose évidemment problème dans des régions où le sol est occupé par un grand nombre de cultures (nombre important de pixels mixtes), spécialement en Europe et particulièrement en France. Ceci a rendu nécessaire l'application de techniques spécifiques de classification «subpixel» pour effectuer l'opération de désagrégation de l'information et permettre ainsi de retrouver les signatures spectrales propres à chaque composante «pure» de l'occupation du sol, dans notre cas celle de la prairie pure (Faivre et Fischer 1997).

Pour les mêmes périodes et RFs nous disposons des estimations journalières des variables (données STICS) qui prennent en compte les aspects productifs du système, c'est-à-dire l'indice foliaire (LAI en m<sup>2</sup> feuille/ m<sup>2</sup> sol), la biomasse sèche disponible (MSEC - kg de matière sèche par jour) et la production instantanée de matière sèche (DMSEC - différence entre les MSEC de deux jours consécutifs (MSEC<sub>t</sub> - MSEC<sub>t-1</sub>)). Par ailleurs, des indicateurs de stress sont également disponibles : le stock d'eau disponible dans le sol (RU en mm), l'indice de stress hydrique (TURFAC défini par le rapport entre l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration maximale (ETM)) et l'indice de stress azoté (INNS ou indice de nutrition azoté, calculé comme le rapport entre la teneur réelle en azote et la teneur en azote qui satisfait les besoins d'une croissance optimale (Lemaire et Salette 1984)).

Pour mettre en relation les variables satellitaires et de croissance, en premier lieu on a évalué sa relation avec un indice de végétation, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). En deuxième lieu, autres indices ont été évalués pour rechercher les variables plus corrélées (variables satellitaires et variables de croissance).

## RESULTATS

Pour comprendre l'effet de la désagrégation des données satellitaires, l'évolution décennale de la bande 3 (proche infrarouge) du capteur VEGETATION (PIR ou B<sub>3</sub>) au cours de l'année 1999, pour la RF 8310, est présentée dans la figure 2.



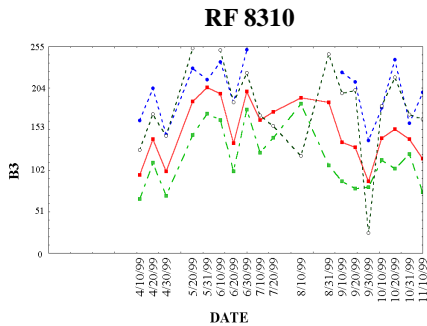


Figure 2: Evolution temporelle de la réflectance acquise dans la bande spectrale B<sub>3</sub> (proche infrarouge) pour la RF 8310: ( —■— ) Moyenne de 25 pixels; ( —▲— ) Prairie; ( —◆— ) Culture accompagnant; ( —□— ) Autres cultures

Comme première approximation de l'étude des cycles de croissance à partir d'information satellitaire, nous présentons l'évolution du NDVI et du LAI (calculés comme la valeur maximale simulée par STICS-prairie sur 10 jours) pour l'ensemble des RFs (Figure 3).

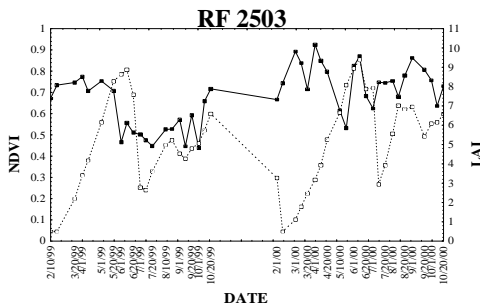


Figure 3: Evolution comparée du NDVI fourni par le capteur VEGETATION(—■—) et du LAI simulé par STICS-Prairie (—□—) pour les différentes régions fourragères

Il est donc évident que le NDVI n'est pas capable pour la plupart des RFs de bien reproduire les variations temporelles et spatiales du LAI à l'échelle régionale. Ceci nous a amené à considérer d'autres sources d'information comme les bandes du bleu (B<sub>0</sub>), du moyen infrarouge (B<sub>4</sub> ou MIR) et la recherche d'indices de végétation plus performants calculables à partir de toutes ces informations spectrales. Comme résultat il est présentée une table avec les coefficients de corrélation parmi les variables satellitaires et de croissance (Table 1).

SAT. / PROD.	DMLAI	DMMSEC
B0	.1772	.0114
B2	.1581	.0015
B3	.4190	.2299
BMIR	-.0417	-.1146
NDVI	.0608	.1626
SWVI	.5540	.4041
C3DC4	.4289	.3409
RVI	-.0359	.0234
TVI	.0671	.1605

SAVI	.3649	.2633
PVI	.4283	.2862
ARVI	-.0253	.1160

Tableau 1: Corrélations de variables sur l'ensemble des deux années 1999 et 2000

L'indice de végétation SWVI et la différence entre la bande 3 et la bande 4 (C3MC4) sont les variables satellitaires qui sont le mieux corrélées aux variables productives. Ainsi, la relation avec le LAI présente un coefficient de corrélation de  $r=0.55$  (DM et DY) pour le SWVI et  $r=0.42$  (DM et DY) pour C3MC4. La relation avec MSEC présente un coefficient de corrélation  $r=0.40$  pour SWVI et  $r=0.41$  pour C3MC4 pour un total de 594 données.

La capacité du SWVI comme estimateur du LAI, en appliquant une relation exponentielle, permet de proposer un suivi temporel du LAI sur les différentes RFs (Figure 4).

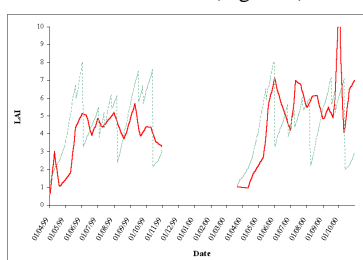


Figure 4: Evolution temporelle du LAI<sub>VGT</sub> ( — ) et du LAI<sub>isop</sub> ( — ) pour la RF 8310

## CONCLUSIONS

L'information obtenue par le capteur VEGETATION puis désagrégée pour correspondre à la réponse de la prairie pure dans les longueurs d'onde de l'infrarouge proche et de l'infrarouge moyen, a montré une très bonne correspondance avec l'évolution temporaire de certaines variables comme le LAI et la matière sèche. Cette correspondance a été sensiblement améliorée à partir du calcul des indices de végétation, à travers la combinaison et la normalisation des bandes qui le composent (cas de SWVI). Ces corrélations ont été sensiblement améliorées par l'application de modèles explicatifs qui reproduisent mieux la dépendance entre les variables SWVI et LAI (fonction exponentielle), et par la sélection de périodes où il n'existe pas de déphasage temporaire ou d'erreur dans le modèle.

L'information satellitaire, par l'accès qu'elle donne à certaines variables biophysiques, comme le LAI, donne une vision de la dynamique réelle de la couverture végétale. On a vu que selon les régions, les années et les périodes du cycle, les estimations faites à partir des données satellitaires sont en plus ou moins grand accord avec les estimations faites par le modèle, mettant en évidence certaines limites du modèle dans la représentation de la réalité. Les méthodes d'assimilation par forçage, comme celle que nous avons utilisée à des fins de démonstration dans ce travail, permettent de réaliser une véritable complémentarité entre télédétection et modèle, pour aboutir à une estimation plus exacte de la production prairiale. Nous avons montré en particulier qu'un gain important pouvait être fait grâce à l'utilisation de la télédétection, non pas tant dans le bilan global de production, que dans la représentation des variations inter annuelles dans le cas d'années climatiques un peu exceptionnelles (sécheresse), et dans la représentation de la dynamique intra annuelle (représentation des dates de coupe et des démarrages de croissance).

Au-delà du travail réalisé dans cette thèse, le forçage des données de LAI dans le modèle STICS lui-même permettrait de tirer parti à la fois de la connaissance écophysologique et agronomique renfermée dans le modèle et de l'actualisation spatiale et temporelle permise par les données de télédétection. On pourrait envisager également des méthodes plus sophistiquées, comme le ré-étalonnage, qui permettraient de ré-estimer région par région certains paramètres du modèle STICS dont on peut craindre qu'ils ne soient pas parfaitement adaptés. On pense en particulier à celui impliqué dans le redémarrage de la croissance après l'hiver ou après les coupes (LAI initial), ou celui impliqué dans la détermination des dates des coupes (somme de températures). Certaines divergences des estimations ISOP par rapport à la vision télédétection étant probablement imputables à l'estimation de certaines variables d'entrée (par exemple, la réserve utile du sol),

on pourrait envisager de les re-estimer par assimilation. Enfin, une source de divergence entre ISOP et la télédétection étant possiblement liée à la représentativité des fenêtres VEGETATION par rapport à l'ensemble de la RF, on pourrait tenter d'améliorer cette représentativité. On pourrait conduire l'assimilation en utilisant l'ensemble des pixels d'une RF (et pas seulement les fenêtres d'étude) en donnant ainsi une caractérisation spectrale exhaustive de la RF, plus compatible avec la résolution d'ISOP. Une autre voie serait d'adopter une résolution plus fine que la RF, en travaillant sur des unités spatiales de taille plus petite (cantons ou communes par exemple), à la fois pour les données VEGETATION et pour les sorties ISOP. Cette voie, qui permettrait de mieux prendre en compte les variations intra RF de sol, de climat et de techniques, serait cependant infiniment plus lourde en terme de traitement de données et demanderait une modification substantielle du fonctionnement de ISOP.

#### **REFERENCES**

- BRISSON N. ET AL. 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.
- GOWARD, S.N.; TUCKER, S.J. AND DYE, D.G., 1985. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetation* 64: 3-14.
- HENTGEN A., 1982. Une méthode pour améliorer la connaissance de la production disponible des surfaces herbagères au niveau national. *Fourrages* 92, 15-49
- PARUELO, J.M., OESTERHELD, M., DI BELLA, C.M., ARZADUM, M., LAFONTAINE, J., CAHUEPE, M. AND REBELLA, C.M., 2000. Estimation of primary production of sub-humid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science* 3, 189-195.
- SEGUIN, B., 1993, NOAA/AVHRR data for crop monitoring at a regional level: Possibilities and limits in the European Context. *EARSeL Advances in Remote Sensing* 2: 87-93.
- SIMS, P., SINGH, J. S. & LAUENROTH, W.K., 1978, The structure and function of ten western North American grassland. *Journal of Ecology* 66, 251-85.

Séminaire STICS : 23-24 Janvier 2003  
Session 5 : Couplage avec d'autres modèles et spatialisation  
**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. Avant 2001, le refus des primes PAC pour les cultures intercalaires empêchait de fait l'adoption de tels systèmes par les exploitants agricoles. En 2001, des modifications réglementaires ont été effectuées en France : elles permettent désormais aux agriculteurs d'adopter des systèmes de culture agroforestiers sur leurs exploitations. La validation par la Commission Européenne d'une mesure agri-environnementale agroforestière nationale française facilite également l'adoption de ces systèmes de culture. Cependant, 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.ensam.inra.fr/safe/>), un travail de modélisation des interactions arbres-cultures est en cours. Ce modèle appelé HySAFE 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.



Fig 1 : Moisson dans une parcelle agroforestière noyer-céréales (âge des arbres : 25 ans).

## Modélisation des interactions entre arbres et cultures

L'arbre introduit une hétérogénéité dans la parcelle cultivée: ombre, prospection racinaire, zone non travaillée avec flore spontanée, 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. La culture intercalaire influence 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 HySAFE que d'intégrer ces processus.

## Mise en œuvre informatique

La modélisation de l'hétérogénéité spatiale de la culture influencée par l'arbre est obtenue par exécution parallèle du modèle de culture sur des sous-unités spatiales. Ce type de découpage en grille est adopté par plusieurs modèles de simulation agroforestiers (Mobbs et al 1999, Van

Noordwijk et al 2000), et est permis par la plate-forme de modélisation CAPSIS (De Coligny, 2001). Cette plate-forme de modélisation de peuplements forestiers, développée en JAVA, propose un ensemble d'outils génériques pour la description de plantations d'arbres spatialisés ainsi que pour la gestion et la comparaison de scénarios sylvicoles. On a donc décidé d'implanter HySAFE sous CAPSIS mais cela imposait d'écrire l'ensemble du modèle en JAVA. Or aucun modèle de culture validé n'existe à ce jour en JAVA. Cependant, grâce à une bibliothèque spéciale (Java Native Interface), JAVA offre la possibilité de communiquer avec des modules externes écrits en C ou C++ et compilés en DLL. L'existence d'une version C de STICS (Poupa, 2003) a été un élément décisif pour retenir STICS comme modèle de culture dans HySAFE, au détriment des modèles DSSAT qui n'existent qu'en Fortran.

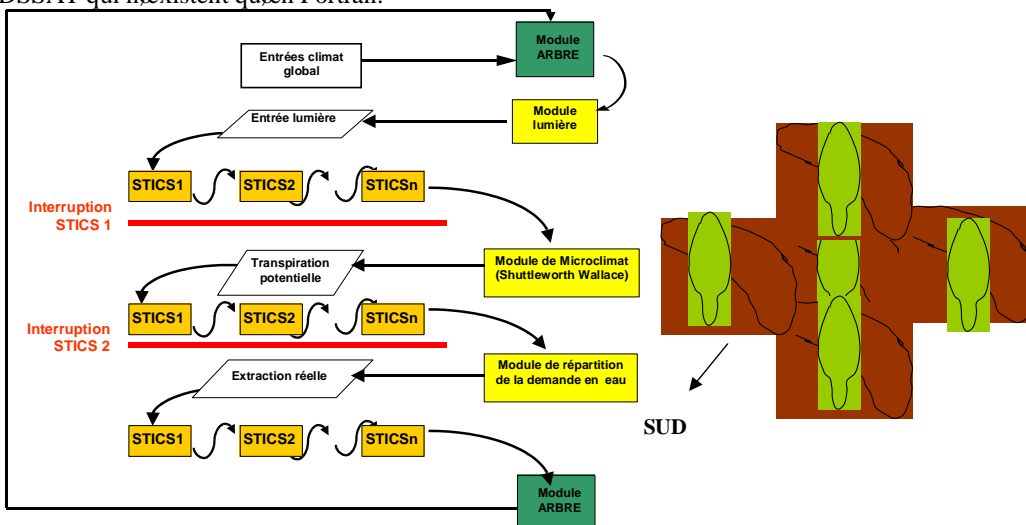


Figure 1 : Organigramme général de HySAFE montrant l'emplacement des interruptions de STICS

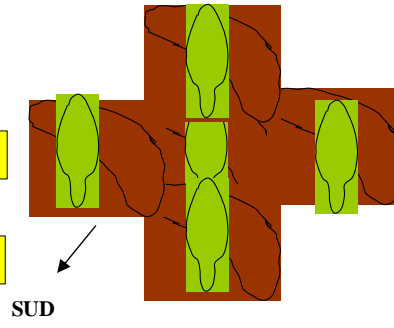


Figure 2 : Mise en œuvre de la symétrie torique sur un arbre moyen central (ombre portée et colonisation racinaire)

Le couplage de STICS et d'un modèle arbre nous a conduit à étudier les problèmes suivants :

- L'arbre et toutes les instances de la culture doivent échanger des informations au pas de temps quotidien (résolution des modules de compétition). Il est apparu nécessaire d'interrompre STICS au sein même de sa boucle journalière, au moins deux fois chaque jour (Figure 1).
- Pour éviter de générer des effets de bordure artificiels, une symétrie torique doit être appliquée à la scène simulée (ombrages, colonisations racinaires, Figure 2).
- L'intégration de certains processus communs est indispensable, pour éviter conflits, incohérences ou redondance. Par exemple, il ne peut pas y avoir deux modules séparés d'extraction de l'eau du sol.

Nous avons adopté une solution mixte de couplage (Fig. 3) :

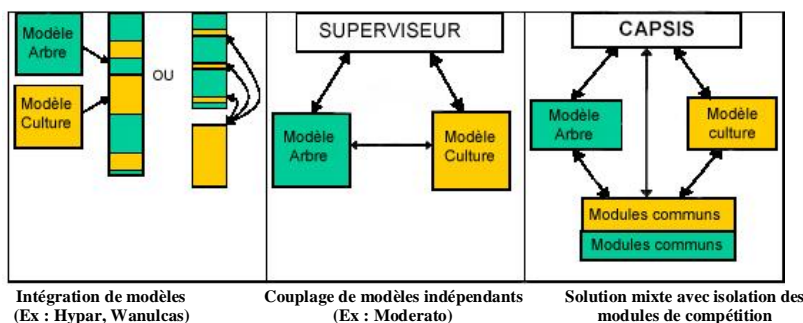


Figure 3 : Modes de couplages entre modèles et solution retenue pour HySAFE

Les modules décrivant des processus communs ont été analysés afin de décider s'ils devaient être écrits en JAVA ou en C, et si, dans ce cas, le code C de STICS pouvait être utilisé « en l'état ». Nous souhaitons en effet modifier au minimum le code de STICS. Il a été conclu que les données communes d'entrée (initialisation des variables d'état, description géométrique de la scène simulée, variables de commande telles que le climat) seraient 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, éclaircissement). Les modules communs décrivent les processus d'interaction entre l'arbre et la culture et sont de 3 types : partage des ressources (lumière, eau, azote) ; colonisation dynamique de l'espace souterrain par les racines ; microclimat aérien résultant de l'interaction arbres-cultures.

Dans la version actuelle de HySAFE, toutes les instances de STICS sont interrompues 2 fois par jour, pour permettre le calcul des interactions avec les arbres. La première interruption permet de résoudre globalement le calcul du microclimat aérien (méthode Shuttleworth et Wallace), la seconde permet de calculer le partage des ressources souterraines en eau et azote. Il reste à valider que ces interruptions en cours de journée n'entraînent pas d'erreurs dans les résultats de simulation de STICS.

### Problèmes de temps d'exécution et de mémoire

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 chargé en mémoire. Il faut donc conserver en mémoire toutes les variables de STICS pour chaque cellule, afin de pouvoir relancer la simulation après chaque interruption. Dans sa version Fortran, STICS utilise un « common block » unique (zone mémoire regroupant toutes les variables utiles à l'exécution du modèle). Dans la version C, ce « common block » s'est traduit par plusieurs tableaux (occupant 255 Ko pour STICS 5.0) regroupant ces variables selon leur type (caractère, booléen, entier ou réel). Pour une grille de 400 cellules, une zone mémoire de 100 Mo est nécessaire. Afin de réduire ce besoin de mémoire, une analyse est en cours pour trier les variables de STICS et dupliquer en mémoire uniquement les variables modifiées au pas de temps journalier. La procédure de copier/coller des tableaux mémoire, très consommatrice en temps machine, est utilisée à chaque interruption de STICS. Pour une grille de 400 cellules et une simulation de 50 ans, on aura 15 millions d'interruptions de STICS (400 x 2 x 365 x 50). On cherche à limiter le nombre d'interruptions de STICS à une seule interruption quotidienne. Cela nécessiterait probablement de modifier l'ordre d'enchaînement général de STICS. Plusieurs autres difficultés restent à résoudre : enchaînement des cycles culturels annuels (réinitialisation simplifiée par l'usage de la DLL, mais stabilité à contrôler); accélération souhaitable de STICS; réduction du nombre d'instances de STICS effectivement simulées.

Pour rester dans des temps de calcul acceptables, toute amélioration de la vitesse d'exécution de STICS est utile. On envisage notamment d'augmenter l'épaisseur des mini-couches de sol (sauf en surface) à la fois pour abrégé les calculs et pour réduire la taille des tableaux mémorisés. Pour réduire le nombre d'instances de STICS calculées, on pense regrouper les cellules similaires en familles, par un algorithme de classification, et de ne faire qu'un calcul par famille.

### Conclusion

HySAFE présente une caractéristique originale : l'exécution simultanée de nombreuses instances parallèles non indépendantes du modèle de culture STICS. C'est l'arbre qui, en colonisant plusieurs cellules de la grille, les rend interdépendantes. Une telle modélisation représente un niveau supplémentaire de difficulté par rapport aux modélisations spatialisées où les instances parallèles du modèle de culture ont un fonctionnement indépendant (modèles bassin-versant). D'autres exemples de modèles nécessitant des liaisons fonctionnelles entre les modèles de culture parallèles pourraient bénéficier de la technologie adoptée : agriculture de précision avec effets de voisinage, propagations de maladies ou ravageurs au sein de la parcelle, modèles hydrologiques avec écoulements obliques.

### Références

Mobbs D.C., Lawson G.J., Friend A.D., Crout N.M.J., Arah J.R.M., Hodnett M.G., 1999. **HyPAR** Model for agroforestry systems - Technical Manual for Version 3.0. DFID Editeur, Midlothian, UK, 112 pages

Van Noordwijk, M., Lusiana, B., 1999. **WALNULCAS** a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 43:217-242.

Coligny F. de (Avril 2001). **CAPSIS** Documentation de Référence Capsis 4 (v1.1). INRA-AMAP, Montpellier.

Poupa J.C. (2003). Présentation de **STICS** version C, Séminaire **STICS** 2003 en Arles (voir ce document).

## **Zones Agricoles et Climat: vers une meilleure prise en compte de ces régions dans les modèles globaux**

*Sébastien Gervois, Nathalie de Noblet-Ducoudré, Nicolas Viovy, Philippe Ciais, Nadine Brisson, Bernard Seguin.*

### RESUME:

Les cultures sont un système optimisé pour la production et occupent environ 30 % de l'Europe. Le but de notre étude est de quantifier l'impact des cultures sur les flux de surface et le climat. Il est nécessaire pour cela d'intégrer les zones agricoles dans les modèles globaux de biosphère comme ORCHIDEE (Krinner et al., en prep.). Ces modèles sont initialement prévus pour ne simuler que les surfaces naturelles. En effet, dans la version standard d'ORCHIDEE, les zones agricoles sont assimilées à des herbacées C3 et C4 dont la photosynthèse est plus efficace et donc la productivité accrue par rapport à une herbacée naturelle. Pour améliorer la représentation des zones agricoles dans ORCHIDEE, nous avons choisi d'utiliser le modèle agronomique STICS (Brisson et al. 1998) que nous avons couplé à ORCHIDEE. Chaque jour STICS calcule et envoie à ORCHIDEE le LAI, le profil racinaire, la hauteur de végétation le stress azoté. Cette nouvelle version du schéma de surface sera présentée dans la première partie de notre présentation. Nous montrerons la bonne capacité de ce modèle couplé à reproduire les cycles végétatifs ainsi que les flux d'eau et de carbone sur des sites de blé et de maïs. Ensuite, nous présenterons les premières expériences à l'échelle régionale où nous comparerons les rendements simulés dans le cas du blé et du maïs avec les données de la FAO.



## Modélisation intégrée du transfert de nitrate sur le bassin de la Seine

Eric Gomez (CIG ó Ecoles des Mines de Paris)

L'accroissement régulier des concentrations en nitrate observées dans les eaux superficielles et souterraines du bassin de la Seine, depuis les années 70, est un sujet de préoccupation, tant du point de vue de l'approvisionnement en eau potable, que de celui des conditions d'eutrophisation du milieu.

Cette augmentation générale des teneurs en nitrate est en grande partie imputée aux activités agricoles, qui ont connu de profondes modifications depuis l'après-guerre

Pour quantifier le lien qui existe entre la contamination nitrique du système hydrologique et les activités agricoles pratiquées au cours des trois dernières décennies, un modèle intégré a été développé pour simuler, à l'échelle régionale, le transfert des nitrates depuis les sols jusqu'aux eaux de surface, en tenant compte du transport dans la zone non-saturée et les aquifères.

Ce projet nécessite une approche pluridisciplinaire. Ainsi, trois modèles existants ont été associés au sein d'une structure informatique commune. Il s'agit du modèle agronomique STICS (simulation des flux de nitrates à la base de la zone racinaire), du modèle hydrologique couplé MODCOU (simulation des écoulements superficiels et souterrains) et du modèle hydrogéologique NEWSAM (simulation du transport de matières en solution dans le domaine souterrain).

Des développements conceptuels ont été nécessaires dans au moins deux directions. D'abord, pour prendre en compte les hétérogénéités spatiales rencontrées à l'échelle du bassin de la Seine, une procédure de régionalisation du modèle STICS a été mise au point. Ensuite, pour assurer la continuité du transfert des nitrates dans le domaine souterrain, deux modèles ont été développés, l'un simulant le transfert dans la zone non-saturée, l'autre simulant le transfert en aquifère pour traiter un cas particulier.

La mise en oeuvre du modèle intégré requiert, d'une part, de construire le modèle hydrodynamique quasi-tridimensionnel du bassin de la Seine qui comporte une couche de surface et 3 couches aquifères, et d'autre part, de segmenter le bassin en unités spatiales sur lesquelles auront lieu les simulations STICS. La validation se fait de manière indépendante pour les différents modèles composants le modèle intégré. Les résultats sont en bon accord avec les données disponibles.

Un exemple d'application du modèle intégré sur le bassin de la Marne permet d'établir un bilan des flux d'azote sur ce bassin. Pour la première fois, un outil de modélisation couvrant l'ensemble des processus de circulation de l'azote dans un grand bassin versant est ainsi en place. Les résultats de ce travail illustre l'aptitude du modèle intégré à reproduire avec un réalisme acceptable le comportement d'un bassin de taille régionale vis-à-vis des flux d'eau et de nitrates.

# Utilisation de modèles de culture pour l'aide à la décision dans le cadre de l'agriculture de précision : spatialisation grâce à l'assimilation de données de télédétection

M. Guérif, D. Hollecker, avec la participation de  
N. Beaudoin, C. Bruchou, V. Houlès, J.M. Machet, B. Mary, S. Moulin, B. Nicoullaud.

## Introduction

Avec l'évolution des moyens de mesure, des modèles d'interprétation et des outils de gestion de l'information, il est devenu envisageable de prendre en compte l'hétérogénéité parcellaire dans la gestion des cultures, que ce soit dans un objectif d'application uniforme ou spatialement modulée des techniques : c'est une des dimensions de ce qui est couramment appelé "agriculture de précision".

Au delà des informations sur les états du milieu et de la culture dont on dispose, il est indispensable d'élaborer des outils d'aide à la décision, reposant sur ces informations, et qui permettent d'établir des préconisations d'application des techniques.

Les modèles de culture sont des outils intéressants pour constituer de tels outils. Ils permettent en effet de simuler de façon dynamique le fonctionnement du système sol-plante en fonction du forçage climatique et technique et donc de fournir des éléments de diagnostic sur l'état du sol et de la culture. Ils permettent également de simuler l'évolution selon différents scénarios techniques et climatiques et aider à la prise de décision.

Pour permettre d'atteindre l'objectif visé, on doit vérifier que les modèles choisis, au-delà du fait qu'on les utilise bien à l'intérieur de leur domaine de validité, satisfont à deux types d'exigences :

bien décrire les processus affectés par la technique culturale dont on cherche à préconiser l'application (par exemple ceux liés à la gestion de l'azote dans le cas de la fertilisation azotée);

pouvoir rendre compte des effets de la variabilité spatiale des états du milieu ou de la culture à grande échelle. Cette deuxième exigence suppose 1) que l'on dispose du paramétrage des fonctions du modèle sur l'ensemble des situations rencontrées ; 2) que l'on sache décrire les variables d'entrée du modèle avec une résolution spatiale suffisamment fine vis à vis des objectifs. Cette 2ème exigence de spatialisation du modèle peut être largement facilitée par le recours à des techniques d'assimilation de données acquises en cours de culture par télédétection (Launay et Guérif, 2002). Les capteurs de télédétection dans le domaine solaire donnent en effet accès, grâce à l'inversion de modèles de transfert radiatif (Moulin et al., 2003), à des variables d'état du couvert telles que l'indice foliaire et la teneur en chlorophylle des feuilles. Ces estimations sont disponibles de façon exhaustive sur l'ensemble des parcelles avec une résolution spatiale métrique ou décimétrique selon le vecteur (tracteur, avion ou satellite), avec une certaine répétitivité temporelle, dépendante elle aussi du vecteur. Ces estimations permettent, en mettant en œuvre des méthodes d'optimisation, de ré-estimer des valeurs de paramètres ou de variables d'entrée, et de forcer le modèle à simuler au mieux les valeurs "observées".

Ces méthodes sont mises en œuvre dans le projet développé à Laon, principalement autour de la mise au point d'une méthode de pilotage de la fertilisation azotée du blé. On en développe ici le principe et les premiers résultats, illustrés avec le modèle Stics-blé et les 2 parcelles-années en blé du dispositif. Le même travail a été réalisé avec modèle Sucros-betterave appliqué aux 2 parcelles-années en betterave (Guérif et Launay, 2003). L'objectif est ici de montrer comment l'assimilation de données en cours de culture permet de réaliser une meilleure spatialisation du modèle ; l'évaluation de la méthode se fait par comparaison des rendements simulés par le modèle avec la carte de rendement réalisée.

## Matériel et méthodes

Les données expérimentales. Le dispositif expérimental est constitué de deux parcelles de 10 ha au sein d'une exploitation agricole située à Chambry (Aisne), cultivées alternativement en blé pendant les 2 premières années d'étude (2000 et 2001) (Guérif et al., 2001.)

Caractéristiques des sols. On dispose d'une caractérisation fine (une centaine de sondages pour 10 ha) de la pédologie (nature des horizons, teneur en cailloux, obstacles à l'enracinement) sur l'ensemble du profil de 0 à 150 cm : 40 à 50 unités cartographiques de sol ont été définies selon les parcelles. Des fonctions de pédotransfert locales ont été définies (Beaudoin et Nicoullaud, 2003) qui permettent d'associer à chaque type de sol des propriétés particulières (densité, capacité de rétention de l'eau à des potentiels divers). Sur une grille régulière (points espacés de 36 m), des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur la couche 0-30 cm.

Les teneurs en eau et en azote du sol par couche de 30 cm de 0 à 150 cm ont été mesurées sur la grille régulière à différentes dates (semis du blé, hiver (mi février), récolte), puis interpolées (Bruchou et Mary, 2001). Elles permettent de fournir au modèle des valeurs initiales au semis ainsi que des données de validation aux autres dates.

**Etats de croissance obtenus par télédétection.** A plusieurs dates entre le début avril et la fin juin, des mesures ont été acquises sur les parcelles par la société Astrium grâce à un spectroradiomètre CASI (32 bandes spectrales), avec une résolution de 2 m. Des données SPOT (résolution 20 m) ont également été acquises mais ne sont pas utilisées ici. Ces mesures ont permis d'estimer, par inversion des modèles Prospect et Sail (Moulin et al, 2003) des valeurs d'indice foliaire (LAI) et de teneur en chlorophylle des feuilles (Cab). Ces valeurs ont été corrigées par étalonnage avec des mesures réalisées au sol au même moment.

**Le modèle de culture.** On utilise le modèle STICS-blé (Brisson et al, 1998) dans sa dernière version (5.0), pour laquelle on ne disposait pas encore de la calibration complète (travail en cours). On a vérifié sur la version antérieure qu'il était bien sensible à l'expression de la variabilité des caractéristiques du sol (Houlès et al., 2002) et qu'il reproduisait correctement la réponse à la fertilisation azotée. On y a adjoint un formalisme empirique (Hollecker, 2003) permettant de simuler le contenu en chlorophylle des feuilles en fonction de la quantité d'azote des parties aériennes, fondé sur les résultats de Houlès et al (2001).

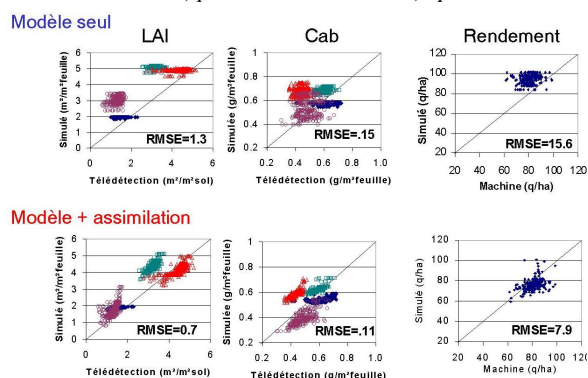
**La résolution spatiale de travail.** On a considéré une résolution variable en définissant des grilles de maille carrée de dimension variable (entre 4 et 20m. ; seuls les résultats à 20 m sont présentés ici. On parlera donc d'UC (unités cartographiques de sol) et d'UG (unités de grille). Les données sol (permanentes et temporaires) et les données d'états de croissance (LAI, Cab) ont permis de renseigner ces différentes unités de fonctionnement dans un SIG.

**La méthode d'assimilation des données issues de la télédétection.** On utilise une méthode type Simplex qui, en minimisant un critère de distance entre les valeurs estimées par le modèle et les valeurs "observées" par télédétection, permet de ré-estimer certains paramètres ou variables d'entrée du modèle. Le choix des paramètres et variables d'état soumis à la ré-estimation a été fait selon 2 critères: leur variabilité spatiale probable en fonction de la variabilité des caractéristiques du sol, des techniques culturales et des interactions sol\*technique\*plante et leur importance confirmée par l'analyse de sensibilité du modèle (Rugé et al, 2002). Nous avons retenu la volatilisation de l'engrais qui détermine son efficacité V, la profondeur de l'obstacle à l'enracinement O, variable capitale pour l'absorption d'eau et d'azote, et la profondeur de minéralisation de la matière organique, P. Différentes stratégies d'assimilation ont été tentées en faisant varier 1, 2 ou 3 paramètres: V, VO et VOP.

## Résultats

La simulation directe, sans assimilation, indique une surestimation des LAI à certaines dates; l'examen date à date montre une faible variabilité des LAI simulés et une mauvaise corrélation avec les LAI mesurés. Le biais global est moins fort pour la teneur en chlorophylle, mais la corrélation date à date est aussi mauvaise. Les résultats des 3 stratégies sont très semblables en terme de performance pour la restitution du rendement : réduction de 19.1 à 9.7% pour la meilleure, VO (Fig. 1), avec des effets de compensation dans les valeurs des paramètres re-estimés. La restitution cartographique du paramètre "obstacle à l'enracinement" (Fig. 2) illustre

Figure 1. Résultats des simulations a) par le modèle seul et b) après assimilation des données de LAI et Cab



à 4 dates sur 1) LAI, 2) Cab, 3) le rendement final.

l'intérêt de la méthode pour l'estimation spatialisée de certaines caractéristiques inconnues du sol. Dans notre cas, on peut comparer cette carte à celle dressée par le pédologue et mettre en évidence des discordances qu'il convient ensuite de valider.

La carte des rendements simulés (Fig. 3) montre que l'assimilation permet de se rapprocher des gammes de valeurs des rendements mesurés et d'incorporer (par rapport au modèle seul) la variabilité spatiale existant dans les images télédétection.

### Discussion et perspectives

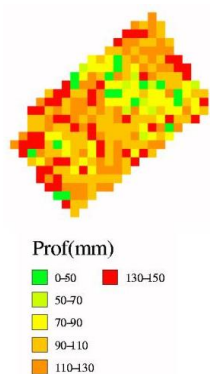


Figure 2. Carte des valeurs du paramètre « profondeur de l'obstacle à l'enracinement » estimée par la stratégie VO.

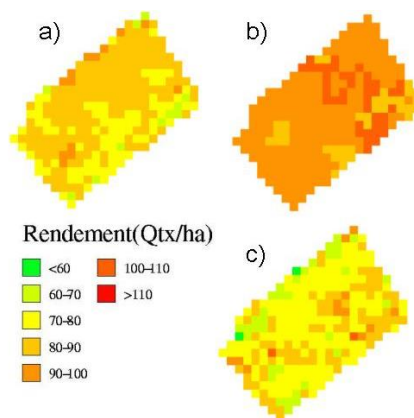


Figure 3. Carte des rendements simulés avec le modèle seul puis avec assimilation VO comparés aux rendements mesurés.

Ces premiers résultats montrent le potentiel de la méthode. Ils restent à affiner après l'incorporation des résultats du travail en cours sur la calibration de STICS 5. Des améliorations doivent également être apportées à la méthode d'optimisation : introduction de l'erreur faite sur les estimations de LAI et Cab à partir des images de télédétection, de l'information sur les valeurs probables des paramètres. Les performances de ce type de méthode restent très liées aux possibilités d'assimilation de données, à leur nombre et à leur position dans le temps (Launay, 2002; Launay et Guérif, 2002).

Au delà de l'application envisagée ici, ce type de méthode est applicable à l'assimilation (ou l'inversion) de toute information acquise en cours de culture : mesures de teneur en eau du sol par résistivité électrique, mesures de télédétection dans différentes longueurs d'onde, mesures automatisées du rendement. La détermination des caractéristiques permanentes des parcelles, dans le cas où elles ne sont pas connues, pourrait s'envisager par l'inversion de "collections" de cartes de rendement, en utilisant un modèle tel que STICS qui permet de simuler des successions de culture.

Cette spatialisation du modèle constitue la première étape de la méthode qui conduit à l'élaboration de la préconisation de la fertilisation azotée. La 2<sup>ème</sup> étape de cette méthode consistera à réaliser des simulations de scénarios techniques et climatiques et à trouver l'optimum d'une fonction de coût fondée sur des variables de production (rendement, qualité) et des variables environnementales relatives aux pertes d'azote.

### Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Action INRA « Agriculture de Précision ». Il a bénéficié de la collaboration de la société Astrium pour l'acquisition et le traitement des images CASI. L'ensemble des traitements et mesures ont été réalisés sur le terrain grâce à la dynamique équipe de techniciens de l'Unité d'Agronomie de Laon (E. Venet, F. Mahu, D. Boitez et C. Dominiarczyk) et à la très active et complice collaboration de MM Jacques et François Fontaine, agriculteurs à Chambry.

### Références

Beaudoin et Nicoulaud, 2003. à paraître Actes de l'AIP Agriculture de Précision  
Brisson et al, 1998. Agronomie

Bruchou et Mary, 2001. 3<sup>ème</sup> European Conference on Precision Agriculture, Montpellier (FRA)  
Launay, 2002. Thèse INAPG.  
Launay et Guérif, 2002. Congrès de la Société Européenne d'Agronomie, Cordoue (SP)  
Guérif et Launay, 2003. 66<sup>ème</sup> congrès IIRB San Antonio, Texas (USA)  
Guérif et al, 2001. 3<sup>ème</sup> European Conference on Precision Agriculture , Montpellier (FRA)  
Hollecker, 2003. Mémoire de fin d'études ISARA ó ESA Purpan.  
Houlès et al., 2002. Congrès de la Société Européenne d'Agronomie, Cordoue (SP)  
Moulin et al., 2003. à paraître Actes de l'AIP Agriculture de Précision  
Ruguet et al, 2002. Agronomie.

## **Cstics : Couplage informatique de STICS avec des modèles extrinsèques**

*Jean-Claude Poupa*

L'évaluation de politiques environnementales nécessite de disposer d'observations dans un espace géographique et historique. La dimension géographique définit des territoires : région, pays, bassin versant... La dimension historique intègre les rotations des cultures et les évolutions technologiques et conjoncturelles.

Des données statistiques sont disponibles pour les productions et consommations marchandes. Elles n'existent pas pour les productions connexes et consommations non marchandes : *aménités positives* pour la fixation du carbone ou la protection des paysages ; *aménités négatives* pour les pollutions diffuses ou les consommations de ressources naturelles limitées.

Un modèle de culture permet de simuler, à partir de choix techniques réels ou hypothétiques, pour différents climats, la dynamique quotidienne d'une culture sur une parcelle, et finalement un ensemble de productions et consommations marchandes et non marchandes associées. Il offre la possibilité de générer des données statistiques pour l'ensemble des parcelles d'un territoire sur une période historique, donc d'évaluer à terme les effets de l'adoption de nouvelles pratiques culturales. A cette échelle, ces données doivent être reprises dans des modèles extrinsèques.

Dans un tel processus, il s'agit d'effectuer des millions de simulations élémentaires et de faire en sorte que les modèles puissent communiquer par échange de variables dûment choisies. Ce couplage pose d'abord des problèmes de définitions et spécifications formelles non contextuelles indépendantes des disciplines scientifiques. Il faut ensuite disposer d'algorithmes d'évaluation efficaces, fiables et évolutifs, non liés à des technologies matérielles et logicielles propriétaires, susceptibles d'être traduits dans différents systèmes et langages informatiques.

### **Formalisation des algorithmes**

Le logiciel STICS est décrit sous la forme d'un système d'équations numérotées, 121 pour la version 5, qui énumèrent des **expressions arithmétiques** à évaluer quotidiennement, systématiquement ou dans des séquences conditionnelles ou itératives contrôlées par des **expressions logiques**, pour des variables simples ou des vecteurs pour le système sol-plante. Cette première formalisation est néanmoins non suffisante pour reconstruire le logiciel en fonction des objectifs de couplage évoqués, et l'optimiser. Il faut aussi décrire formellement les structures syntaxiques utilisées pour contrôler le déroulement de la simulation et l'enchaînement des évaluations quotidiennes : séquences conditionnelles et itératives, appels de fonctions, ruptures de séquences. Ces structures sont reconnues par analyse syntaxique du code source.

La **Théorie des Langages formels** fournit les outils mathématiques pour décrire ces structures au moyen de grammaires génériques, et définit des méthodes pour produire des automates de reconnaissance des langages générés par ces grammaires. La difficulté inhérente au langage informatique Fortran provient de sa relative ancienneté, les séquences conditionnelles et itératives étant initialement contrôlées par des branchements explicites.

En l'absence de règles strictes d'écriture, les ruptures de séquences traduites par des branchements avant ou arrière vers des étiquettes se traduisent par une explosion combinatoire de la complexité et l'impossibilité pratique de trouver une grammaire générique, à l'image d'un calcul numérique empirique non restitué dans une formule. Notons qu'un traducteur du langage Fortran en langage C va sans doute générer les mêmes branchements.

Les versions ultérieures du langage Fortran, et la norme ANSI, ont introduit de nouvelles instructions pour gérer les structures conditionnelles. En l'absence d'autres moyens que le

branchement explicite pour une structure itérative, il est néanmoins possible de respecter des principes simples, qui font qu'un bloc d'instructions sera exécuté en totalité ou pas du tout, donc ne contient pas de ruptures de séquences, par branchement ou retour.

L'analyseur du code Fortran de STICS a montré, à quelques exceptions près, l'absence de branchements imbriqués complexes. Dans la mesure où le logiciel n'utilise qu'un sous-ensemble du langage Fortran, il est possible de définir des grammaires génériques simples pour reconnaître les structures de contrôle, les expressions arithmétiques, les conditions logiques, les appels de fonctions, les déclarations, les formats Fortran de lecture des paramètres.

### Regénération de code

Les grammaires précédentes génèrent des **langages algébriques** simples reconnus par des automates, en aval desquels est produit un code dans un langage informatique cible, dont la norme ANSI du langage C pour garantir portabilité et pérennité.

Un premier prototype a été produit avec la version 4 de STICS, sur le thème de l'usage agricole de l'eau, pour un couplage avec un modèle économétrique afin de déterminer un prix pour cette ressource. Il enchaîne les simulations des récoltes simultanément pour des ensembles d'itinéraires techniques et de climats. Seules les options utiles pour ce projet avaient alors été retenues et des traductions effectuées au vu du code, l'objectif premier étant d'examiner la faisabilité.

Après confrontation avec d'autres équipes scientifiques et la sortie de la version 5, il a été décidé de poursuivre ce projet informatique sans restriction, donc avec toutes les options, et en restant suffisamment générique pour pouvoir intégrer les développements actuels et futurs : un groupe de projet pluridisciplinaire a été constitué fin 2002.

Des structures syntaxiques nouvelles ont été définies pour traduire un maximum de branchements explicites, principalement ceux figurant en fin de blocs dans les séquences conditionnelles et les boucles. Finalement, le nombre de branchements non reconnus par ces grammaires est réduit à quelques dizaines : la restructuration s'effectue alors au vu du code.

Le code C de la version 5 de STICS est aujourd'hui généré, et s'exécute. Les paramètres sont lus dans les fichiers WINSTICS. Les fichiers temporaires sont supprimés, les données étant conservées en mémoire. Les éditions formatées ne sont pas reprises mais un environnement de suivi est fourni pour gérer des points d'arrêt et visualiser les valeurs.

Ce code équivaut au code Fortran, aux éditions près, donc doit rendre les mêmes valeurs, y compris en reproduisant les erreurs. L'explication des différences résiduelles est à rechercher dans les conventions adoptées par les compilateurs, en matière d'initialisation, pour les opérations non définies et les conversions implicites des nombres réels en entiers. La validation est en cours.

### Variables endogènes et exogènes

Les 2014 variables informatiques globales de la version 5 de STICS sont déclarées dans des espaces communs et désignées par des identificateurs propres. Une variable déclarée n'est pas définie tant qu'elle n'a pas reçu une valeur, par lecture dans un fichier ou dans une opération d'affectation, éventuellement par passage de paramètre. L'analyse syntaxique retient 1290 variables globales définies.

Toutes les fonctions STICS peuvent consulter et modifier toutes ces variables STICS depuis l'initialisation jusqu'à la restitution finale. Les paramètres du modèle de culture, invariants pendant la simulation, de même que les options et paramètres d'édition, variables exogènes, sont traitées comme les variables endogènes, évaluées par le modèle.

Les variables exogènes sont lues ou initialisées avant de démarrer la simulation. Les variables endogènes reçoivent des valeurs par affectation dans les fonctions d'évaluation quotidienne. L'analyse syntaxique a permis de déterminer dans quelles fonctions sont modifiées ou seulement consultées les variables. Ces informations sont gérées dans des **relations** : le calcul relationnel

permet pour chaque fonction de repérer les variables utilisées, endogènes évaluées ou seulement consultées, ou exogènes invariantes.

L'application pour la version 4 a montré que chaque fonction utilise un nombre restreint de variables, et n'en évalue que quelques unes, parfois une seule. Plutôt que de gérer toutes les variables dans un espace commun libre, il est prévu de séparer variables exogènes et endogènes. Si toutes doivent être accessibles en lecture, seules les variables endogènes évaluées dans une fonction doivent pouvoir recevoir une valeur dans cette fonction.

Cette structuration améliore considérablement la fiabilité du code. Elle permet en outre de restreindre les sauvegardes aux seules variables modifiées pour restituer un état antérieur ou communiquer avec d'autres processus. C'est aussi un moyen de validation du code à travers la visualisation des variables effectivement utilisées et évaluées.

### **Opérations et fonctions non définies**

Dans une expression arithmétique ou logique, une variable référencée peut ne pas être définie ; pour certaines opérations, comme l'exponentiation et la division, les domaines de définition sont à contrôler : les résultats vont dépendre du compilateur.

### **Modélisation des données**

Globalement, un modèle de culture est une fonction qui évalue des productions pour une culture sur une parcelle pour un climat et un itinéraire technique. Les résultats peuvent être des valeurs globales à l'issue de la campagne culturale, mais aussi des séries chronologiques élaborées à partir des évaluations quotidiennes.

L'*itinéraire technique* varie en fonction des décisions quotidiennes, d'abord le choix variétal puis les opérations culturales. Ces décisions sont représentables dans des séries chronologiques.

Le *climat*, aléatoire, est restitué par des séries chronologiques. Il est défini sur un territoire à partir des données de stations météorologiques, disponibles sur longues périodes.

La *plante* est décrite par un ensemble ouvert de variables simples, représentées dans des vecteurs pour les espèces végétales, des matrices pour les groupes variétaux.

Le *sol* de la parcelle est décrit d'abord globalement puis pour une suite d'au plus cinq horizons : les premières valeurs sont regroupées en vecteurs, les secondes dans des matrices.

Les *paramètres généraux* regroupent des variables descriptives indépendantes des techniques, du climat, de la plante et du sol. Classés par familles, ils constituent des vecteurs, ou des matrices pour des entités décrites par une typologie : cailloux, engrais, résidus, débris végétaux...

Les *constantes* qui figurent en clair dans le code définissent des ensembles de nombres.

Une restructuration dans une base de données permettrait de partager un fonds commun et de disposer de jeux de données validés, tout en fiabilisant les accès. Les domaines de variation des variables aléatoires paramètres du modèle sont représentables dans une telle base.

### **Couplage et restructuration**

Le couplage doit permettre d'effectuer simultanément un grand nombre de simulations. La solution la plus efficace serait de faire communiquer des modèles vus comme des fonctions qui échangent des paramètres. Le passage par des fichiers est à proscrire parce que mobilisant des processus mécaniques avec des temps d'accès infiniment grands relativement aux temps de calculs.

Quelle que soit la solution retenue, il y a lieu d'optimiser les performances pour la simulation élémentaire. Cela passe par un réexamen de modes de calcul, pour éviter de refaire les mêmes évaluations, ou le calcul initial de paramètres fixes, qui ne dépendent que du lieu.

Des gains importants sont vraisemblablement possibles dans les fonctions qui traitent du système sol-plante, en limitant l'exploration des couches du sol au strict nécessaire. On peut aussi envisager



de choisir les valeurs de certaines constantes informatiques en fonction des applications, selon les précisions requises.

### **Conclusion**

Ce projet d'ingénierie informatique reprend les acquis du groupe STICS. L'objectif est de construire, sur la base de spécifications formelles complémentaires relevant des mathématiques appliquées, une plate-forme de développement pluri-disciplinaire, avec :

- 1) la modélisation numérique existante, qui reprend le système d'équations et les domaines de définition ;
- 2) quelques grammaires formelles simples, reconnues par des automates, lesquelles génèrent des langages algébriques ;
- 3) des éléments d'algèbre relationnelle, pour structurer l'ensemble des variables informatiques mais aussi pour construire des bases de données de paramètres.

**L'enjeu est de construire un système d'accueil dans un cadre formel commun pour relier des modèles élaborés par des équipes de recherches dans différents domaines, ceci afin de pouvoir, en l'absence d'observations, simuler efficacement des politiques environnementales à l'échelle de territoires sur des périodes suffisamment longues.**

## Utilisation spatialisée de STICS pour évaluer l'impact de modifications de pratiques agricoles sur le lessivage de nitrates d'un site expérimental en Petite Beauce

Schnebelen Nathalie<sup>(1)</sup>, Nicoulaud Bernard<sup>(2)</sup>, Bourennane Hocine<sup>(2)</sup>, Couturier Alain<sup>(2)</sup>, Verbèke Bernard<sup>(3)</sup>, Revalier Christian<sup>(3)</sup>, Bruand Ary<sup>(4)</sup>, Ledoux Emmanuel<sup>(5)</sup>

Email : [Nathalie.Schnebelen@orleans.inra.fr](mailto:Nathalie.Schnebelen@orleans.inra.fr)

<sup>(1)</sup> INRA Orléans Unité Infosol, BP 20619 Ardon, 45 166 Olivet Cedex, France

<sup>(2)</sup> INRA Orléans Unité Science du Sol, BP 20619 Ardon, 45 166 Olivet Cedex, France

<sup>(3)</sup> Chambre d'Agriculture du Loiret, BP 9020, 45 921 Orléans Cedex 9, France

<sup>(4)</sup> ISTO, Université d'Orléans, Géosciences, BP 6759-45067 Orléans Cedex 2, France

<sup>(5)</sup> Centre d'Informatique Géologique, ENSMP, 77 305 Fontainebleau, France

### Introduction

En Petite Beauce (Loiret), les caractéristiques du milieu physique et des pratiques agricoles sont à l'origine d'une forte pollution diffuse par les nitrates de l'aquifère des Calcaires de Beauce sous-jacent. Afin d'évaluer l'impact d'une modification des pratiques agricoles sur la réduction du lessivage de nitrates vers les eaux souterraines, une expérimentation a été menée de 1991 à 1998 sur un site expérimental de 7 km<sup>2</sup> situé en Petite Beauce du Loiret, près de la commune de Villamblain.

### Présentation du site expérimental et de la Petite Beauce

Les pratiques agricoles et les sols du site expérimental de Villamblain sont représentatifs de ceux de la Petite Beauce. Les cultures prédominantes sont les cultures de blé d'hiver et de maïs grain. Les principaux types de sols sont des Calcosols, Calcisols et Brunisols dans l'ensemble peu épais.

Sur le site expérimental, les pratiques agricoles ont été modifiées conformément au code de bonne pratique agricole préconisé au niveau national par le Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates et les phosphates (CORPEN). Les modifications portent essentiellement sur :

- la gestion raisonnée de la fertilisation azotée, en ajustant annuellement les doses d'engrais azotés par la méthode du bilan azoté prévisionnel. De 1991 à 1998, les agriculteurs ont ainsi réduit de 27 kg N.ha<sup>-1</sup> en moyenne les doses d'engrais apportées aux cultures et ceci sans perte de rendements, voire même avec une augmentation dans certains cas. Les économies d'azote les plus importantes ont été réalisées sur maïs, avec moins 55 kg N.ha<sup>-1</sup>, soit une diminution d'environ 25% par rapport à la fertilisation habituelle.
- la gestion de l'interculture longue, qui coïncide souvent avec la période de drainage automnale et hivernale, par l'implantation de Cultures Intermédiaires dites "Pièges À Nitrates" (CIPAN). Les cultures intermédiaires implantées sur le site expérimental de Villamblain sont essentiellement de la moutarde et de la phacélie. De 1990 à 1998, la part des surfaces en cultures intermédiaires a ainsi augmenté de 0 à 40% de la surface totale. Moins de 8% des sols restent actuellement nus en automne-hiver, au lieu de 50% environ avant le début de l'expérimentation.

## Démarche adoptée

L'évaluation de l'impact des modifications des pratiques agricoles du site expérimental sur le lessivage de nitrates s'appuie sur des suivis *in-situ* et sur des simulations réalisées à l'aide du modèle de culture STICS.

- Les suivis comprennent la mesure sur la période 1994-1998 des flux d'eau et de nitrates à la base du sol de quatre cases lysimétriques : deux cases situées à l'intérieur du site expérimental, sous pratiques modifiées, deux autres situées à l'extérieur du site, sous pratiques habituelles. Les suivis comprennent également, sur la période 1991-1998, la mesure des quantités d'eau et d'azote nitrique du sol pour chacune des soixante parcelles du site expérimental.
- Les simulations des flux d'eau et de nitrates ont été réalisées à l'aide de la version 4 du modèle de culture STICS. Les simulations ont tout d'abord été effectuées ponctuellement, à l'échelle des cases lysimétriques, puis spatialement, à l'échelle du site expérimental. L'utilisation spatialisée de STICS a nécessité le développement d'une approche qui tient compte de la variabilité spatiale des sols, des différentes cultures et des techniques culturales associées.

## Principaux résultats

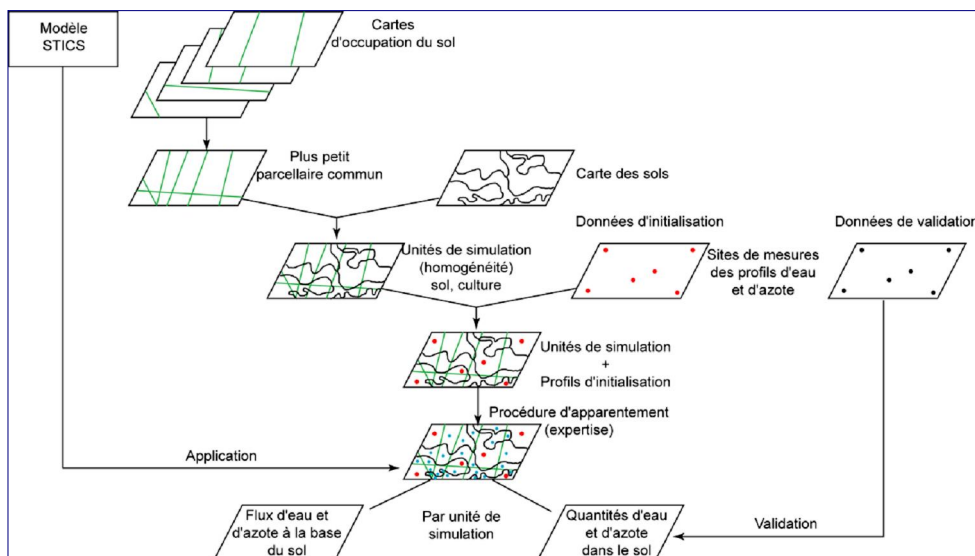
### *Simulation ponctuelle du lessivage de nitrates*

Le modèle STICS a été utilisé à l'échelle des cases lysimétriques afin d'examiner, à partir de mesures *in-situ* dont l'acquisition est relativement aisée sur une très petite surface, la validité de ce modèle dans les conditions climatiques, pédologiques et culturales locales.

La comparaison des valeurs mesurées au niveau des cases lysimétriques avec les valeurs simulées par le modèle STICS a montré que ce modèle fonctionnel simple simule de façon satisfaisante, sur un ou plusieurs cycles culturaux, : (1) les flux d'eau et de nitrates à la base du sol ; (2) les teneurs en eau et les quantités d'azote minéral des différentes couches de sol. Ce modèle peut donc être utilisé pour évaluer l'impact de modifications de pratiques agricoles sur le lessivage de nitrates du site expérimental.

### *Simulation spatialisée du lessivage de nitrates*

L'approche de généralisation spatiale du modèle STICS développée dans le cadre de ce travail (Figure 1) utilise le Système d'Information Géographique Arc/Info. Elle consiste, dans un premier temps, en le croisement des cartes d'occupation du sol sur la période de simulation avec la carte des sols, afin d'obtenir des entités géographiques homogènes sur le plan cultural et pédologique. Ces entités géographiques homogènes définissent les unités de simulation. Dans un deuxième temps, une procédure d'appareillage du type expert permet d'estimer, pour chaque unité de simulation, les valeurs initiales des profils d'eau et d'azote minéral du sol nécessaires aux simulations Cette procédure d'appareillage est basée sur la nature du précédent cultural, de la technique culturale et du type de sol. Elle a été validée de façon satisfaisante sur le site de Villamblain par comparaison des quantités initiales d'eau et d'azote minéral estimées aux quantités mesurées. L'approche de généralisation spatiale du modèle STICS ainsi développée peut être appliquée dans d'autres contextes agronomiques et pédologiques.



**Figure 1** : Schéma de généralisation du modèle STICS au site expérimental de Villamblain

L'approche de généralisation spatiale du modèle STICS a été appliquée à l'ensemble du site expérimental de Villamblain pour la période 1991-1998. Deux types de simulation ont été effectués :

- Le premier type, appelé "simulations sur un cycle cultural", consiste à initialiser chaque année les simulations à partir des contenus en eau et en azote minéral du sol mesurés sur le site expérimental après la récolte des différentes cultures. Ce type de simulations, réalisé avec les pratiques agricoles modifiées (pratiques depuis fin 1991) permet de déterminer le lessivage actuel de nitrates vers les eaux souterraines ainsi que les principaux facteurs contrôlant la variabilité spatiale et temporelle de ce lessivage.
- Le deuxième type, appelé "simulations sur plusieurs cycles culturaux successifs", consiste à initialiser la première année (1991-1992) les simulations à partir des contenus en eau et en azote minéral du sol mesurés sur le site expérimental après la récolte des différentes cultures, puis à utiliser les années suivantes les contenus en eau et en azote minéral simulés chaque année par le modèle pour enchaîner les simulations. Ce type de simulation est utilisé en l'absence de chroniques de mesures des contenus en eau et en azote minéral du sol. Dans cette étude, il a servi à comparer, sur la période 1991-1998, les pratiques agricoles modifiées (pratiques depuis fin 1991) aux pratiques habituelles (pratiques avant fin 1991) sur le lessivage de nitrates. Dans le cas des pratiques habituelles, on ne dispose en effet pas de mesure après fin 1991.

La validité des résultats des simulations sur un cycle cultural a été examinée par comparaison des quantités d'eau et d'azote minéral simulées dans le sol en janvier-février aux quantités mesurées à cette même date. Sur l'ensemble de la période 1991-1998, le modèle sous-estime en moyenne de  $10 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  la quantité d'azote minéral dans le sol en janvier-février. Les résultats des simulations sur un cycle cultural montrent que la teneur en nitrates moyenne sur le site expérimental de l'eau percolant vers la nappe est de  $120 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$  pour la période 1991-1994 et de  $76 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$  pour la période 1994-1998. Sur l'ensemble de la période d'étude (1991-1998), la teneur en nitrates moyenne sur le site expérimental est de  $92 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$ . Les surfaces pour lesquelles l'eau qui percole a une teneur en nitrates inférieure à  $50 \text{ mg NO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$  passent de 20 à 30 % de la superficie du

site expérimental à près de 40 % dans les années 1994-1996. Pour la dernière année, cette proportion est de 50 %.

L'effet du précédent cultural, de l'occupation annuelle du sol et du type de sol sur le lessivage de nitrates a été examiné à partir des résultats des simulations sur un cycle cultural. Les teneurs en nitrates les plus faibles sont systématiquement obtenues après les cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN). La teneur moyenne sur la période 1991-1998 est de  $45 \text{ mg NO}_3.\text{l}^{-1}$ . L'introduction d'une culture intermédiaire diminue ainsi en moyenne la teneur en nitrates des parcelles concernées de  $73 \text{ mg NO}_3.\text{l}^{-1}$ . Ces résultats sont cohérents avec les mesures effectuées au niveau des cases lysimétriques. Pour tous les autres précédents culturaux, les teneurs en nitrates sont nettement supérieures à  $50 \text{ mg NO}_3.\text{l}^{-1}$ , en particulier pour les cultures de pois, de maïs et de blé tendre d'hiver, qui sont présents chaque année, et pour les jachères annuelles. En ce qui concerne l'effet du type de sol, les résultats des simulations ont montré que les sols à faible potentiel agronomique, c'est-à-dire à faible épaisseur (calcosols et calcisols sur le site expérimental), sont les plus susceptibles au lessivage de nitrates.

Les résultats des simulations sur plusieurs cycles culturaux successifs ont montré que, sur la période 1991-1998, les pratiques modifiées permettent de réduire la teneur moyenne en nitrates de l'eau drainée à la base du sol du site expérimental entre 25 et  $43 \text{ mg NO}_3.\text{l}^{-1}$  selon les années. Sur la période 1994-1998, la diminution moyenne simulée pour l'ensemble du site expérimental est de  $38 \text{ mg NO}_3.\text{l}^{-1}$ . Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle mesurée au niveau des cases lysimétriques sur la même période ( $54 \text{ mg NO}_3.\text{l}^{-1}$ ). Les résultats des simulations ont également révélé que la quantité moyenne d'eau percolée est peu différente entre les pratiques agricoles modifiées et les pratiques habituelles. L'introduction des cultures intermédiaires diminue en moyenne de 4 mm par an sur l'ensemble du site expérimental la quantité d'eau alimentant l'aquifère sous-jacent.

## Conclusion

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du modèle de culture STICS, couplé à une approche de généralisation spatiale à partir de données mesurées, permet d'évaluer sur une période de 7 ans l'impact des modifications des pratiques agricoles sur le lessivage de nitrates d'un site expérimental. Les différentes simulations réalisées mettent ainsi en évidence une diminution nette du lessivage de nitrates vers les eaux souterraines suite aux modifications des pratiques agricoles. La gestion de l'interculture longue par l'implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates est particulièrement efficace. Les résultats des simulations révèlent toutefois la persistance de situations à fort risque de lessivage de nitrates. Ces situations conduisent à proposer de nouvelles modifications des pratiques agricoles, notamment en ce qui concerne la gestion de la fertilisation azotée du maïs, la gestion des jachères annuelles cultivées, la gestion de l'interculture après légumineuses et la gestion des résidus de cultures.

## **Spatialisation de STICS à l'échelle de la parcelle en vue d'une irrigation de précision**

Anne Zanolin, Pierre RUELLE, Jacques GRANIER, Bernard NICOULLAUD

La maîtrise de l'irrigation à la parcelle atteint de nos jours un niveau satisfaisant grâce à la bonne connaissance que l'on peut avoir du comportement hydrique du système sol-plante au sein d'une culture, mais aussi grâce aux progrès technologiques concernant les matériels d'irrigation. En particulier, un système d'irrigation par pivot permet de contrôler avec une bonne précision les quantités d'eau apportées aux cultures et leur répartition spatiale. Mais par contre, les méthodes de pilotage de l'irrigation trouvent leur limites lorsque l'on se trouve sur des parcelles fortement hétérogènes : est-il alors pertinent de mettre en œuvre des techniques de différenciation spatiale des apports d'eau ? et sur quelles bases peut-on raisonner une stratégie d'irrigation différenciée ? C'est les questions auxquelles nous avons essayé de répondre dans le cadre d'une étude menée par le Cemagref et l'INRA sur un site en Petite-Beauce.

### **Matériels et méthodes :**

A priori, les techniques d'Agriculture Irriguée de Précision (AIP) peuvent être intéressantes :

- pour de grandes parcelles hétérogènes ;
- lorsque la disponibilité en eau est un facteur limitant ;
- si le risque de lessivage vers la nappe impose de bien contrôler le bilan d'azote.

Ces trois conditions se trouvent réunies sur une grande partie de la Petite Beauce du Loiret. L'étude a donc été menée sur une parcelle de 50 ha cultivée en maïs sur la commune de Villamblain au cours de l'année 2000. Le dispositif expérimental comprenait deux niveaux :

- des mesures spatialisées effectuées sur plusieurs paramètres (profondeur de sol, résistivité électrique, LAI, rendement) avec une densité suffisante pour permettre d'en caractériser l'hétérogénéité spatiale ;
- un suivi complet sur 5 stations choisies au sein de la parcelle, représentant 2 types de sol et 3 niveaux d'irrigation.

En s'appuyant sur les données recueillies au cours de cette campagne de mesure, l'objectif poursuivi est de mettre en œuvre un modèle qui reproduise aussi fidèlement que possible le comportement du système sol-plante, en terme de structure spatiale. C'est à dire que l'on cherche à obtenir, au moyen d'outils de simulation, non seulement des résultats moyens comparables à la réalité observée, mais également des cartographies de ces résultats qui soient comparables aux cartographies réellement observées. Le traitement des données a donc consisté en :

- une analyse statistique et géostatistique des données spatialisées ;
- un calage du modèle STICS à partir des mesures sur les 5 stations ;
- des simulations de STICS couplées avec un logiciel géostatistique (ISATIS), de façon à produire des résultats spatialisés sur lesquelles s'appuie la validation spatiale de l'ensemble ;
- enfin, le modèle spatialisé a été testé pour évaluer des scénarios d'irrigation différenciés sur la parcelle de Villamblain.

### **Calage et validation :**

Le calage de STICS a été fait sur les deux types de sols les mieux représentés sur la parcelle :

- des sols profonds : il s'agit de calcisols, composés d'une épaisseur de 70 cm en moyenne de sol argilo-limoneux de texture homogène, et d'un horizon sous-jacent cryoturbé beige qui débute à une profondeur variable ;

- des sols superficiels : il s'agit de calcosols caillouteux. La couche argilo-limoneuse est moins épaisse et comporte un taux de cailloux important qui lui confère une certaine hétérogénéité spatiale, qui s'ajoute au fait que l'horizon de calcaire dur commence à une profondeur également variable.

Pour chaque type de sol, deux niveaux d'irrigation ont été pratiqués. De plus, une cinquième station en sols profonds en dehors de la zone irriguée a permis de compléter ce calage.

### **Analyse de sensibilité du modèle STICS dans les conditions de la parcelle de Villamblain :**

Les paramètres qu'il nous faut privilégier sont ceux qui présentent une variabilité spatiale nette, et dont la sensibilité sur les rendements et les termes du bilan eau-azote est importante :

Des simulations ont été effectuées pour mettre en évidence la sensibilité à différents paramètres, dans les conditions de Villamblain et pour la campagne 2000. Il est apparu que :

- en sols profonds, les apports d'eau d'irrigation les plus élevés se traduisent par un drainage plus important, aussi bien pendant la culture qu'à l'automne puisqu'une irrigation intensive permet un retour plus rapide à la capacité au champ. Le lessivage des nitrates est légèrement sensible aux apports d'eau, mais dépend surtout des quantités d'azote initiales en profondeur ; une bonne réserve en eau du sol permet de limiter ces lessivages. Cette réserve dépend plus de la profondeur du sol que de la réserve utile volumique, et elle ne conditionne que légèrement la production en matière sèche et en grain.
- En sols superficiels, les effets de l'irrigation sur le drainage et le lessivage d'azote sont moins marqués ; ces résultats dépendent beaucoup plus nettement des réserves utiles des différents horizons et de la profondeur d'exploitation du sol par les racines. La production de matière sèche et de grain est également affectée par l'irrigation, autant que par la réserve en eau du sol.

D'autres paramètres susceptibles de varier spatialement ont fait l'objet de notre attention : ainsi le taux d'azote organique en surface ou le taux de calcaire n'ont pas d'effet significatifs sur les rendements, mais jouent légèrement sur le bilan d'azote ; l'effet sur le lessivage reste cependant limité. La méconnaissance de la variabilité spatiale de ces données est donc sans conséquence sur la suite.

Cette étude de sensibilité nous conduit à poser l'hypothèse que la réserve en eau du sol est le paramètre qui a le plus de poids pour expliquer la variabilité spatiale de la culture. La variabilité des conditions initiales (eau et azote) joue également un rôle non négligeable. La phase de validation spatiale doit nous permettre de confirmer qu'une bonne connaissance de la variabilité de ces paramètres est suffisante pour connaître la variabilité spatiale de la production végétale.

### **Spatialisation du modèle STICS**

La validation spatiale a été faite de la manière suivante :

- les variables d'entrées retenues (profondeur de sol, teneurs initiales en eau et azote par horizon) ont fait l'objet d'une simulation stochastique. Un jeu de données spatialisées a été généré sur un maillage 5m x 5m. En ce qui concerne les profondeurs de sols, on s'est servi des mesures de résistivité comme estimateur auxiliaire : l'analyse géostatistique ayant montré que cette donnée était un bon indicateur de la profondeur de l'horizon argilo-limoneux, il était intéressant de l'utiliser de cette façon, puisqu'on disposait de mesures sur une forte densité. La méthode s'est révélée suffisamment précise en sols profonds. En sols superficiels, par contre, où le calcaire sous-jacent est colonisé par les racines sur une profondeur plus ou moins importante, ce phénomène introduit un facteur

de hétérogénéité supplémentaire difficile à maîtriser ; les mesures géophysique ne donnent pas d'indication précise sur ce point. Nous avons néanmoins fait l'hypothèse que la résistivité exprimait au moins partiellement la profondeur utile, et qu'une composante aléatoire.

- les simulations STICS ont été pratiquées en chaque point du maillage, et les cartographies des rendements simulés ont été comparées aux cartographies mesurées lors de la récolte.

Cartographie des rendements simulés et observés sur la zone de calcisol argilo-limoneux profond

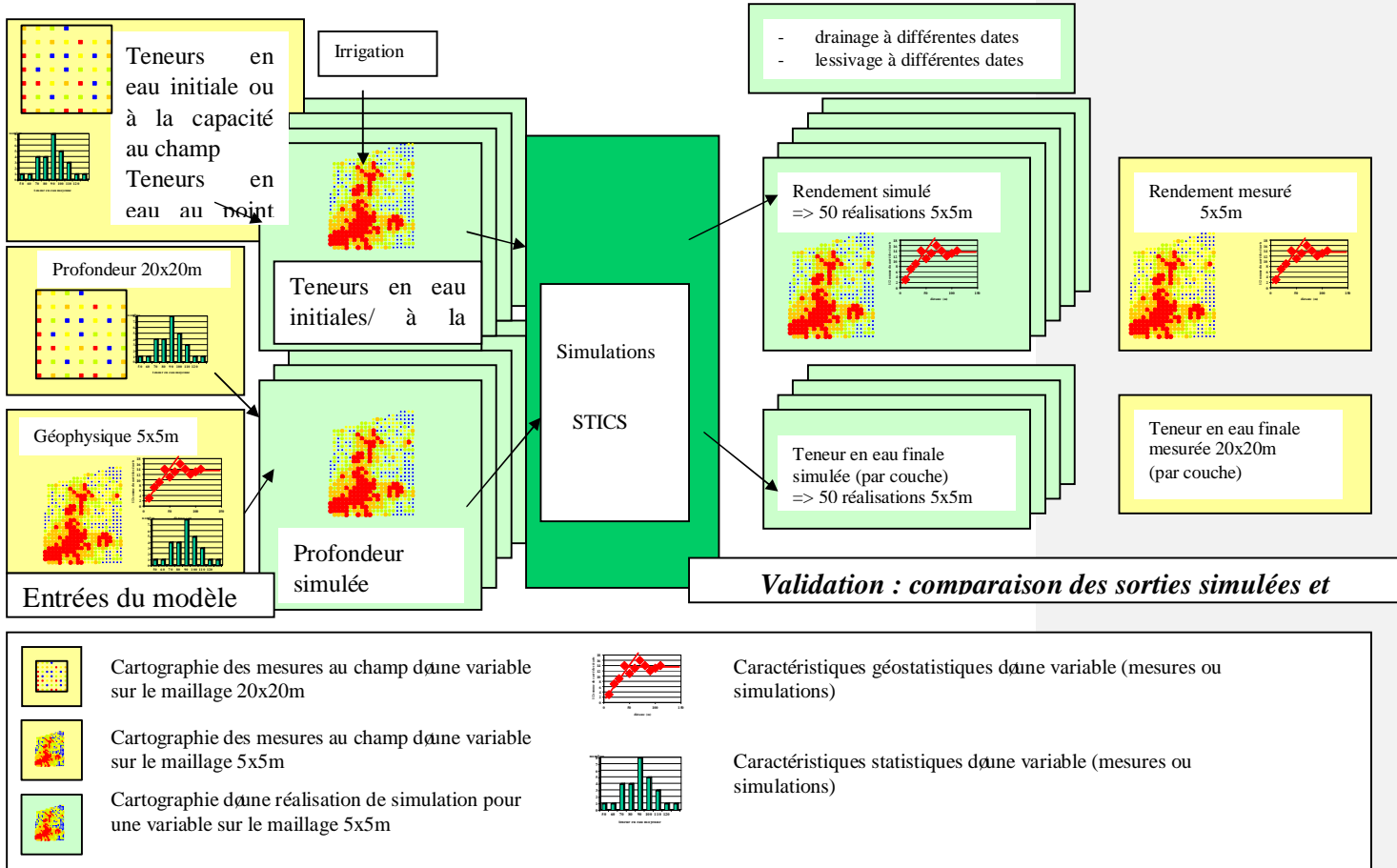
**Conclusion :**

Grâce à un suivi sur deux types de sol extrêmes et différents niveaux d'irrigation, le modèle STICS a pu être validé sur une gamme correspondant aux variabilités les plus pertinentes sur la parcelle d'étude. Le modèle s'est révélé bien adapté pour décrire le comportement d'une culture de maïs dans le cadre d'un objectif d'irrigation de précision. L'outil géophysique est apparu comme un bon moyen d'estimer la variabilité du sol, en ce qui concerne son fonctionnement hydrique. Sur sols superficiels caillouteux, on manque cependant de précision.

Enfin nous avons pu utiliser le couplage réalisé entre STICS et le logiciel ISATIS pour tester des scénarios d'irrigation différenciées. Cet outil pourra être mis en œuvre pour évaluer l'intérêt de l'Agriculture Irriguée de Précision et en établir les stratégies



# Schéma général de simulation



## **Intégration de STICS avec les systèmes d'information géographique, développement d'une interface pour le traitement de données spatiales.**

Jean-Philippe Denux ; Laetitia Caspar

Laboratoire de Télédétection et de Cartographie Numérique  
E.S.A. PURPAN  
75 voie du TOEC - 31076 TOULOUSE cedex 3  
tel : 33(0)5 61 15 30 82 fax 33(0)5 61 15 30 60  
e-mail : [jpdenux@esa-purpan.fr](mailto:jpdenux@esa-purpan.fr)  
web site : <http://www.esa-purpan.fr/ltcn/accueil.htm>

Mots clé : Système d'information géographique, modèle de fonctionnement des cultures, STICS.

L'utilisation d'un modèle de fonctionnement des cultures tel que STICS avec des données cartographiques nécessite l'exécution de milliers de simulations. Pour faciliter cette approche spatiale de la modélisation nous avons développé une interface utilisateur qui permet de gérer les paramètres initiaux, de définir des options de traitement et de cartographier les résultats.

La première phase du travail consiste à créer une base de données géographique où les paramètres d'entrée de la modélisation (sol, météo, itinéraires techniques, plante et LAI) sont organisés sous forme cartographique vectorielle. Dans chaque plan d'information thématique, un ensemble de données est associé à chaque entité (polygone). Ces données attributaires sont mises en forme dans un fichier de paramètres au format STICS. Ces fichiers sont créés soit par l'interface WinSTICS soit automatiquement à partir du système d'information géographique.

Cela nous impose d'utiliser des cartes qui représentent une variation discrète de l'information. Les données qui souvent présentent des variations continues dans l'espace (comme le sol ou le climat) devront être simplifiées et traitées avec les outils d'analyse spatiale. Nous introduisons ainsi une troisième dimension thématique aux deux dimensions géographiques pour décrire les profils de sols, l'évolution temporelle du LAI ou celle des données météorologiques.

Le système d'information géographique permet de combiner les cartes de paramètres d'entrée du modèle dans une base de données unique. Cette « geodatabase » est une base de données relationnelle de type MS Access qui peut gérer des entités géographiques. Elle contient une table où les objets spatiaux sont associés aux paramètres d'entrée de la modélisation. C'est cette table qui va permettre d'organiser les multiples simulations. Il faut noter que ce modèle d'organisation est utilisable sans prendre en compte les objets géographiques. L'interface est alors utilisée pour gérer des simulations multiples et chaque ligne de la table représente une simulation spécifique sans caractéristique spatiale. Dans le cas où un (ou plusieurs) des paramètres d'entrée du modèle n'est pas cartographié, un fichier par défaut pourra être défini, il sera utilisé pour la simulation associée à chaque entité.

L'interface utilisateur n'est pas liée à un logiciel de SIG en particulier, elle est conçue pour prendre en compte différentes versions du modèle STICS. Elle se compose de quatre écrans successifs, qui doivent être suffisamment simples pour être rapidement pris en main par un utilisateur non averti. Le premier permet de choisir le modèle utilisé et des caractéristiques du traitement. Avec le second on va définir l'organisation des paramètres d'entrée du modèle dans la geodatabase. Ensuite les résultats à cartographier pourront être sélectionnés soit dans les variables du bilan soit dans un des rapports (au sens « STICS »). Ces caractéristiques peuvent être enregistrées dans un profil que l'utilisateur peut sauvegarder et réutiliser. Enfin la dernière partie de l'interface sert à l'optimisation, à la gestion et au suivi du traitement.

Les résultats sont organisés dans la geodatabase où des nouvelles tables sont générées pour les données du bilan et celles des rapports aux différentes dates fixées par l'utilisateur. Une table de validation du traitement stocke les renseignements sur la modélisation et permet d'identifier des erreurs. Le schéma relationnel entre les différentes tables de paramètres et de résultats est établi automatiquement. Grâce au SIG, cela permet d'utiliser directement les sorties du modèle pour la cartographie et l'analyse spatiale.

## Utilisation d'une série de données SPOT-HRV pour la paramétrisation du modèle STICS : Application à la spatialisation du bilan hydrique en condition semi-aride (Plaine du Tensift, Maroc).

(1) Duchemin B., F. Frappart, P. Maisongrande, B. Mougenot, G. Dedieu,

(2) R. Hadria, A. Lahrouni, S. Khabba

(1) Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO, Toulouse, France)

(2) Faculté des Sciences Semlalia (Marrakech, Maroc)

Correspondant : benoit.duchemin@cesbio.cnes.fr

### I- Introduction

Le projet SudMed du CESBIO a pour ambition de développer des méthodologies permettant d'intégrer les données de terrain, les modèles de processus et les données de télédétection pour documenter, comprendre et prévoir l'évolution de régions semi-arides. La région pilote du projet est le bassin versant de l'oued Tensift, région d'environ 20,000 km<sup>2</sup> 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 et l'orge, l'olive et les agrumes. L'arboriculture étant prioritaire en terme d'irrigation, la variabilité spatio-temporelle du bilan hydrique à l'échelle régionale est fortement liée aux apports d'eau pour les cultures céréalières, qui occupent environ 30% de la surface totale des périmètres irrigués de la plaine. Pour un développement agricole durable, il est par conséquent nécessaire d'estimer et de spatialiser l'évapotranspiration réelle des couverts céréaliers. Dans ce but, un exercice de spatialisation du modèle STICS (Brisson et al. 1998) a été mené à partir d'une série temporelle d'images satellite à haute résolution spatiale : huit scènes acquises par le capteur SPOT-4/HRVIR pendant la saison agricole 2001/2002.

### II- Traitement des données satellitaires

Le site test, sélectionné dans une zone aménagée par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH), couvre une superficie de 3×3 Km<sup>2</sup>. Durant la saison 2001/2002, le capteur HRVIR a acquis huit images qui ont été rectifiées géométriquement, étalonnées et corrigées des effets atmosphériques (logiciel SMAC, Rahman et Dedieu, 1994). Une procédure de classification non supervisée sur les séries d'images du NDVI (Rouse et al., 1974) a permis de définir 15 classes (figure 1). L'analyse des séries temporelles de NDVI nous a permis d'exclure 87% de la surface totale qui ne présentait pas des signatures typiques du blé. Ce pourcentage est attribué à la très faible quantité de précipitation (aucune pluie enregistrée en janvier et février 2002) et aux années de sécheresse consécutives qui ont limité la recharge des barrages et la disponibilité des ressources pour l'irrigation.

Sur les 13% restant, la trajectoire du NDVI indique un développement réel des cultures. Afin d'appréhender la variabilité spatiale, 12 classes de céréales irriguées ont été considérées (Fig.1) et, pour chaque classe, trois scénarios de développement de culture ont été construits (Fig.2). L'idée est : (1) de considérer un scénario moyen pour prévoir des estimations moyennes du développement et de l'évapotranspiration de la culture, (2) d'analyser la différence entre les scénarios minimal et maximal en terme de déficit hydrique extrême. Les conditions moyennes de développement sont considérées en moyennant spatialement le NDVI sur chaque classe, cependant que les conditions extrêmes correspondent au pixel de la classe où la somme temporelle du NDVI est respectivement minimale et maximale. La figure 2 illustre les résultats de ce traitement pour la classe 12, qui permet de définir 36 cas recouvrant une large gamme de pratiques agricoles (irrigation) sur le site test.

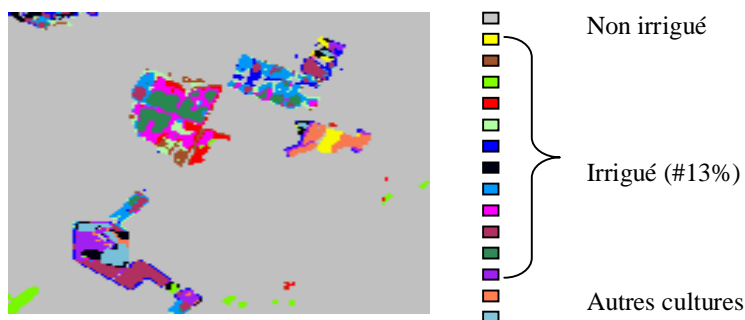


Figure 1 : Classification de la zone d'étude à partir du NDVI déduit de SPOT/HRVIR.

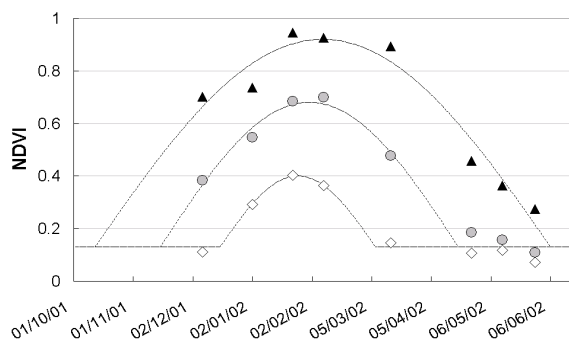


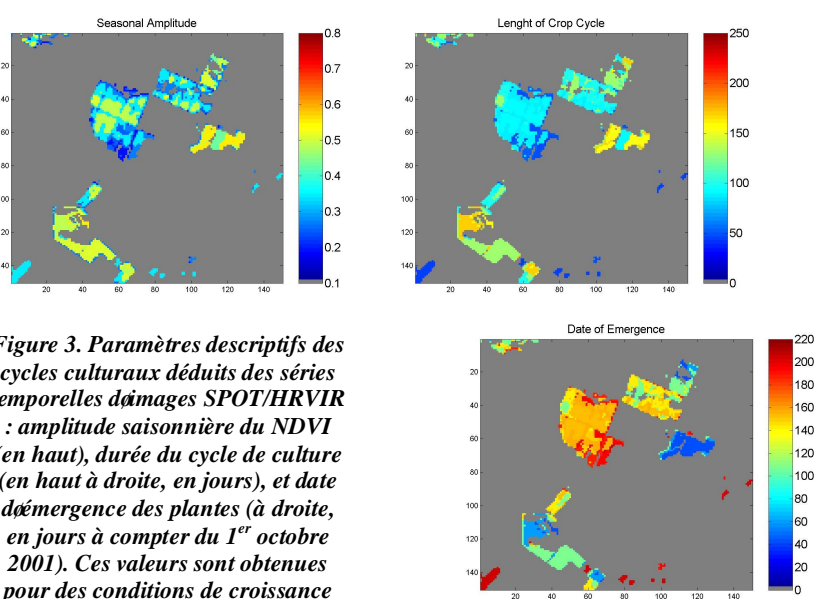
Figure 2. Séries temporelles de NDVI observées par SPOT pour la classe 12, pour un développement des cultures minimum (losange), moyen (cercle) et maximal (triangles)

### III- Estimation de l'évapotranspiration

Pour mettre en œuvre le modèle STICS, nous avons utilisé un climat «moyen» construit à partir des données météorologiques acquises par l'ORMVAH entre 1999 et 2001. Seul les données pluviométriques correspondent réellement à la saison étudiée (2001/2002). Une première analyse de sensibilité du schéma résistif (Shuttleworth and Wallace, 1985) implémenté dans le modèle a montré que les paramètres majeurs qui affectent l'évapotranspiration sont : les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement, la densité apparente du sol, la date de semis, la date où l'indice foliaire est maximal et la vitesse maximale de production de surface foliaire. Les propriétés du sol ont été déduites des cartes pédologiques élaborées à l'ORMVAH par application de règles de pédo-transfert (Jensen, 1990). En émettant (et contrôlant au niveau de la simulation) l'hypothèse d'une absence de stress azoté et en activant l'option «irrigation automatique» (plantes irriguées lorsqu'elles commencent à être stressées), STICS fournit la transpiration maximale des plantes.

Les trois paramètres décrivant la croissance et la phénologie des cultures ont été tirés des profils de NDVI soit directement, soit par étalonnage du modèle. En premier lieu, un modèle sinusoïdal de l'évolution du NDVI a été ajusté sur chaque série temporelle (voir exemples en figure 2). Ces modèles sont déterminés par trois paramètres : la date où le NDVI commence à augmenter, qui correspond grossièrement à l'émergence; l'amplitude, qui fournit un indice sur le recouvrement maximal du couvert végétal ; la date où s'arrête la diminution de NDVI, qui indique la récolte ou la sénescence complète. La différence entre cette dernière date et la date d'émergence donne une

estimation de la longueur du cycle phénologique. La figure 3 permet d'étudier la variabilité spatiale de ces trois paramètres, et fournit en outre une vue d'ensemble rapide et synthétique des conditions de développement des cultures. L'analyse de cette figure montre que la croissance fût faible et irrégulière pendant la saison agricole 2001/2002. Les amplitudes sont toutes inférieures à celles habituellement observées pour des cultures annuelles en condition optimale (valeur maximale de 0.55). Les cycles de cultures sont généralement courts, avec une valeur moyenne de 92 jours à comparer avec celles collectées par Allen (1998) en milieu semi-aride, qui varient entre 105 et 140 jours. Les dates d'émergence ont une distribution bi-modale, le NDVI commençant à augmenter soit à partir de janvier-février soit en mars-avril (périodes repérées respectivement par les couleurs bleu/vert et jaune/rouge sur la figure 3). Le premier motif correspond au cycle cultural ordinairement observé en plaine de Marrakech (semis entre novembre et janvier, récolte en mai/juin). Le second indique un retard de l'émergence attribué à l'absence d'eau pour l'irrigation et aux fortes pluies en milieu de saison agricole.



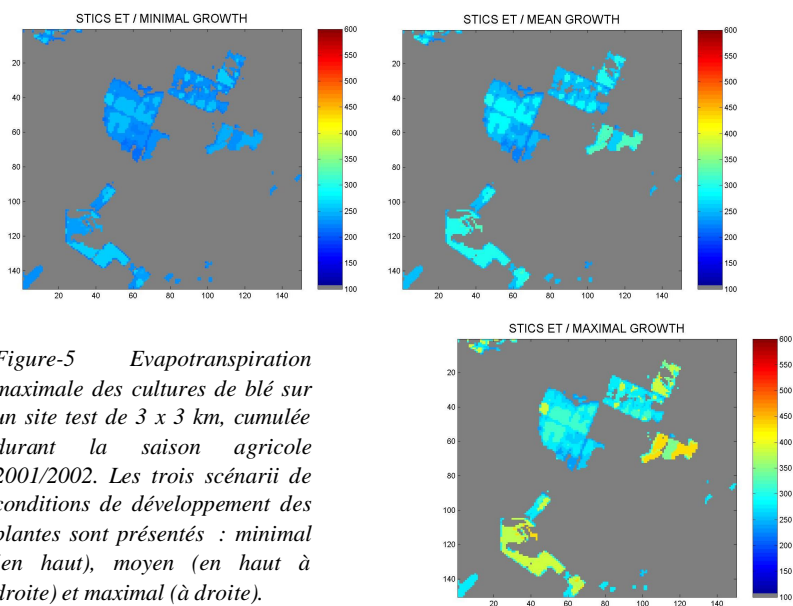
**Figure 3. Paramètres descriptifs des cycles culturaux déduits des séries temporelles d'images SPOT/HRVIR : amplitude saisonnière du NDVI (en haut), durée du cycle de culture (en haut à droite, en jours), et date d'émergence des plantes (à droite, en jours à compter du 1<sup>er</sup> octobre 2001). Ces valeurs sont obtenues pour des conditions de croissance moyenne.**

Les cartes construites précédemment (figure 3) fournissent deux paramètres phénologiques utilisées par STICS : 1) le jour d'indice foliaire (LAI) maximal, pris au milieu de l'intervalle émergence-sénescence ; 2) la date de semis, dont nous émettons l'hypothèse qu'elle est en moyenne inférieure de 15 jours à celle de l'émergence (Allen, 1998). Le paramètre le plus complexe à déduire est la vitesse maximale de production de la surface foliaire car la connaissance du LAI est nécessaire pour l'obtenir. Nous avons pour ce faire calibré la relation NDVI/LAI établie par Asrar et al. (1984), en supposant que les pixels caractérisés par une valeur minimale et maximale de NDVI correspondent respectivement à du sol nu et à un couvert « infiniment » dense. Les valeurs de LAI obtenues aux dates d'observation SPOT sont ensuite utilisées pour optimiser le taux de production de surface foliaire en comparant les valeurs déduites du NDVI et issues des simulation (procédé d'optimisation par la méthode du Simplex implémentée dans STICS).

La figure 4 présente les cartes d'évapotranspiration saisonnière (cumulées des valeurs journalières durant toute la période de simulation : 1<sup>er</sup> Octobre-1<sup>er</sup> juin) obtenues pour les trois scénarii de développement. Les résultats font apparaître le caractère sec de la saison 2001/2002 : seules les valeurs d'évapotranspiration maximales obtenues pour les conditions de développement maximales

(450 mm) apparaissent du même ordre de grandeur que celles reportées pour des céréales bien irriguées en milieu semi-aride. Le scénario moyen conduit à des valeurs plus faibles, résultat plausible puisque l'approvisionnement en eau était limité. La valeur minimale de transpiration correspond au cumul de précipitation. Dans ce dernier cas, le développement de la culture est tellement faible que le modèle ne simule aucune irrigation. Les fortes différences entre les scénarios minimal et maximal indiquent que chaque classe connaît un déficit hydrique prononcé.

Ce premier travail méthodologique montre la capacité des données de télédétection dans un procédé d'étalonnage et de spatialisation calibrer et spatialiser le modèle STICS. Les résultats obtenus en pour une large gamme de conditions de développement des cultures (décrites par les séries temporelles de NDVI) sont cohérents. L'instrumentation d'une parcelle expérimentale dans le cadre du projet Sud-Med (2002-2004) devrait permettre de pallier les limitations de cette étude liées à l'absence de validation et d'approfondir la méthodologie d'assimilation des données de télédétection.



*Figure-5 Evapotranspiration maximale des cultures de blé sur un site test de 3 x 3 km, cumulée durant la saison agricole 2001/2002. Les trois scénarii de conditions de développement des plantes sont présentés : minimal (en haut), moyen (en haut à droite) et maximal (à droite).*

#### Remerciement

Ces travaux sont financés par deux actions du 5<sup>ème</sup> PCRD de la Communauté Economique Européenne : programmes WATERMED ("WATER use Efficiency in natural vegetation and agricultural areas by Remote sensing in the MEDITerranean basin", voir <http://www.uv.es/ucg/watermed>) et IRRIMED ("Improved management tools for water-limited irrigation : combining ground and satellite information through models", programme coordonné par R.Escadafal au CESBIO, 2003-2005). Nous remercions l'initiative d'ISIS (Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT, voir <http://medias.obs-mip.fr/isis>) du Centre National D'Etudes Spatiales, pour l'accès aux données SPOT à un coût réduit.

#### References

- Allen R.G., 1998. Crop evapotranspiration ó Guidelines for computing crop water requirements ó FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998 (ISBN 92-5-104219-5, see <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>)
- Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., Hatfield J.L., 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.* 76 : 300-306
- 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., Delécolle R., 1998 ó a. 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.
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. (editors), 1990. ASCE manual and reports on engineering practice, No 70.
- Rahman H. and G. Dedieu, 1994. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing* 15:123-143.

Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt MD : 1-371

Shuttleworth W.J., Wallace J.S. 1985. Evaporation from sparse canopy: an energy combination theory. Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 111:839-855.



## Assimilation de données économiques par STICS pour l'enrichissement du modèle économique AROPAj

Godard C.<sup>1</sup>, Jayet P.A.<sup>1</sup>, Brisson N.<sup>2</sup>, Roger-Estrade J.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INRA UMR Economie Publique - BP 01 - 78850 THIVERVAL-GRIGNON

<sup>2</sup> INRA UR Climat, Sol et Environnement Domaine Saint-Paul - Site Agroparc 84914 AVIGNON cedex 9

<sup>3</sup> INRA UMR Agronomie - BP 01 - 78850 THIVERVAL-GRIGNON

Dans le cadre de deux projets financés par le programme GICC (Gestion des Impacts du Changement Climatique), puis dans celui d'une thèse, le module agronomique du modèle économique AROPAj va progressivement être enrichi. Plus précisément, il s'agit d'utiliser les résultats de simulations du modèle STICS, à l'échelle de parcelles virtuelles appartenant à des exploitations agricoles types, pour permettre au modèle économique de calculer les rendements des productions végétales en intégrant des paramètres agro-pédo-climatiques caractérisant les différentes régions européennes. Ainsi, l'objectif principal du travail de thèse qui vient de débiter est de construire la courbe de réponse des principales grandes cultures européenne (blé, orges, maïs, colza, tournesol, betterave sucrière, pomme de terre), en terme de rendement à l'azote minéral.

L'échelle d'analyse du modèle économique correspond à des exploitations agricoles types des régions de l'Union Européenne à 15. Ceci entraîne la nécessité de formuler des hypothèses sur les itinéraires techniques types pratiqués dans ces exploitations, le climat moyen et les sols représentatifs des régions retenues pour l'étude, afin de renseigner les entrées de STICS et/ou le paramétrer. Ces hypothèses devront être ensuite validées. Parallèlement, en transformant les données économiques disponibles (charges globales en engrais principalement), la méthode mise au point devra permettre leur assimilation par STICS. Finalement, la démarche conduira à construire et ajuster une courbe du rendement de chaque culture de chaque groupe type, en fonction de la quantité d'engrais minéral apporté, courbe qui peut s'intégrer au module de calcul des rendements d'AROPAj.

1. Formuler et valider les hypothèses pour le fonctionnement de STICS à l'échelle de l'analyse économique du modèle AROPAj.

### 1.1. AROPAj : présentation et principe

Le modèle économique AROPAj se base sur des exploitations virtuelles types de l'Union Européenne à 15. Ces exploitations représentatives de l'agriculture de chaque région administrative de l'UE sont issues d'une typologie qui prend en compte l'OTE (Orientation Technico-Economique qui reflète les principales activités agricoles végétales et animales rémunératrices de l'exploitation), et la classe d'altitude de l'exploitation (0-300m, 300-600m, 600-900m).

Pour chacune de ces exploitations types, le producteur est supposé rationnel économiquement : on fait l'hypothèse qu'il cherche à maximiser son profit. Le modèle économique détermine, pour chaque exploitation, quelle combinaison et quel niveau des productions animales et végétales permettent d'atteindre la marge brute la plus grande, sous des contraintes de capacité de production (la SAU totale et le capital animal sont supposés fixes) et réglementaires (quotas de production, primes diverses de la PAC). La nature des productions animales et végétales est donnée par le RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) européen, ainsi que les niveaux de charges et de rendement liés à chaque production.

Cette source d'information devrait servir à renseigner les entrées de STICS qui sont difficiles à déterminer à l'échelle des exploitations types. En effet, ces dernières ne peuvent pas (sauf cas particulier) être localisées au sein de la région dont elles font partie.

## 1.2. Les conséquences de l'échelle de l'analyse économique pour les entrées de STICS

Ainsi, pour spécifier les entrées de STICS à l'échelle de chaque exploitation type synthétique, des hypothèses doivent être faites pour définir leurs caractéristiques physiques et techniques propres et compléter les informations issues des bases de données. Certaines entrées sont plus difficiles à préciser que d'autres. Les données climatiques, par exemple, sont disponibles, et notre interrogation porte surtout sur la méthode de spatialisation à adopter pour disposer de données cohérentes à l'échelle régionale. Par contre, les caractéristiques du sol et les itinéraires techniques sont plus délicats à choisir. Nous envisageons d'utiliser les références des instituts techniques et des experts pour localiser en particulier les variétés et leur date de semis, les calendriers et doses d'apports d'engrais azotés minéraux. Les données sur l'irrigation et les apports d'azote organique étant moins facilement accessibles à l'échelle d'exploitations virtuelles, le RICA européen peut nous éclairer sur ces pratiques. En effet, nous pouvons supposer que la présence et la nature des productions animales d'une exploitation conditionnent fortement l'apport d'effluents d'élevage aux cultures. De même, en étant capable d'estimer la quantité d'eau consommée par une exploitation type, à partir des données issues du RICA, des hypothèses sur sa répartition au sein de l'assolement peuvent être formulées puis testées lors de simulations. La validation de ces hypothèses sur les données d'entrée du modèle de culture pourra être faite grâce à la confrontation des résultats obtenus à ceux d'expérimentations menées dans des conditions similaires ainsi qu'à des dires d'experts.

Le modèle STICS fonctionnera avec ces informations d'entrée assez restreintes. En même temps, le modèle agronomique devra prendre en compte les conditions et les données imposées par l'économie, c'est-à-dire le rendement et les charges globales en engrais de référence ( $r_0$  et  $E_0$ ), ainsi que la valeur de la dérivée en ce point (issue de l'hypothèse de maximisation du profit du producteur et de la valeur  $w/p$ ). Un mode de fonctionnement permettant au modèle de culture de simuler des apports d'azote minéral « idéaux » pour la plante qui lui permettent d'atteindre  $r_0$  devra également être élaboré.

2. Dédire d'une charge globale en engrais une quantité d'azote minéral et permettre à STICS d'assimiler des données économiques.

Le cœur du « couplage » des deux modèles repose effectivement sur la méthode qui permettra d'harmoniser les abscisses des deux types de courbes utilisées. D'une part, la courbe attendue par le modèle économique représente une fonction de la charge globale en engrais. D'autre part, les points issus des simulations de STICS ont pour abscisse une quantité d'azote minéral. La méthode proposée devra permettre aussi bien à STICS d'assimiler les données économiques qu'à AROPAj d'intégrer les résultats fournis par STICS. À l'aide des prix et des consommations d'engrais de compositions connues pour les différents pays d'Europe, nous essaierons tout d'abord de reconstituer, à partir d'une charge globale en engrais pour chaque culture et chaque groupe type, une quantité et une composition d'engrais fictif. Il sera alors possible d'en déduire une quantité d'azote minéral ( $N_0$ ), et de considérer le point ( $N_0, r_0$ ) comme appartenant à la courbe de réponse construite à partir des simulations de STICS, tout en prenant en compte la valeur de la pente de la tangente en ce point référence. À l'inverse, les points donnés par STICS pourront être « transformés » de manière à permettre l'ajustement d'une courbe analytique dont l'expression pourra s'intégrer au module de calcul des rendements du modèle économique.

3. Ajuster, pour le module de calcul des rendements du modèle AROPAj, une courbe analytique pour chaque culture et chaque exploitation virtuelle (groupe-type)

La courbe du rendement ( $r$ ) de chaque culture de chaque exploitation type en fonction de la quantité d'azote minéral apporté ( $E$ ) qui sera insérée dans AROPAj doit être concave et avoir une limite finie

quand E tend vers l'infini. Ces conditions permettent de définir la situation de production végétale optimale économiquement pour l'agriculteur, en fonction de l'intrant azoté minéral. L'intérêt de cette courbe pour le modèle économique est de pouvoir déterminer cet optimum, tout en tenant compte des conditions techniques et physiques de production, ce qui est réalisé par la modélisation de la culture par STICS. Ainsi, l'expression qui est privilégiée actuellement est :  $r = B \left( \frac{B}{A} \right) e^{-\tau E}$  (où A et B représentent respectivement l'ordonnée à l'origine = rendement sans intrant azoté minéral, et la limite en l'infini = rendement maximal pouvant être atteint). Cette fonction répond effectivement aux exigences précédentes et semble de plus pouvoir s'ajuster aux premiers points issus des simulations du modèle de culture.

L'objectif principalement méthodologique est de mettre au point toutes les étapes permettant d'aboutir à une courbe de réponse propre à chaque culture et chaque groupe type pouvant s'intégrer au modèle économique. A terme, il s'agit de systématiser ces méthodes afin de réaliser automatiquement la génération et l'insertion dans le modèle économique des courbes validées d'un point de vue agronomique.

#### Quelques références :

Brisson 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, in *Agronomy* 18 (1998), p.311-346.

Maugars Solenne, Couplage d'un modèle économique et d'un modèle biophysique pour la quantification des impacts environnementaux des cultures, mémoire de DAA, Septembre 1998.

Jayet P.A., De Cara S., Donati M. Evaluating agri-environmental policies in the UE : some views and extensions from the AROPAj model : Site internet : présentation du modèle AROPAj : <http://eurotools.stat.unibo.it/Brussels.html>

**Validation des estimations régionales de la production des prairies en  
France  
faites à partir de STICS et d'une base de données caractérisant les conditions  
régionales de production.**

**F. Ruget**

Pour les besoins de la politique et des marchés agricoles, les volumes de toutes les productions agricoles doivent être estimés par le Service des Statistiques (SCEES) du ministère de l'Agriculture, de façon à établir les Comptes de la Nation. L'estimation des productions fourragères pose un problème particulier, puisque les fourrages sont largement autoconsommés, et souvent sur pied, et qu'aucune donnée de commercialisation ne peut être confrontée aux estimations. La construction du système ISOP (1998-2000) avait pour but d'estimer les variations interannuelles des productions régionales de prairie à partir d'un modèle de simulation de culture, permettant de s'affranchir des éventuels défauts des estimations habituelles par avis d'experts et de fournir une seconde estimation pour conforter la première. Cependant, il est nécessaire de valider ces nouvelles estimations et cela ne peut être fait qu'à partir des estimations antérieures parfois remises en question.

Le but de ce papier est de présenter une comparaison des deux séries d'estimations, la série faite par le SCEES, par département et celle faite par ISOP, pour chaque région fourragère, (les régions fourragères étant environ deux fois nombreuses que les départements) et de tenter d'analyser les différences observées. Le travail porte sur 19 années, les 15 années servant de référence pour établir les valeurs régionales "normales" (1982-1996) et les années récentes jusqu'à 2000.

Après avoir éliminé, dans la série de référence, les données fausses de façon flagrante, on a calculé l'évolution temporelle moyenne des séries estimées par les experts et par ISOP, par régression des rendements relatifs (rapportés à la moyenne régionale) sur le temps. Tandis que par ISOP, l'évolution moyenne par rapport au temps est presque nulle, elle peut être très forte dans les estimations SCEES de certaines régions (jusqu'à 3 % par an).

Finalement, la comparaison entre les 2 séries porte sur les écarts à la tendance en fonction du temps, ce qui permet d'éliminer les différences liées à la prise en compte ou non de l'évolution des techniques.

La comparaison porte sur les écarts à la tendance des valeurs rapportées à la production régionale moyenne. L'analyse montre que ces écarts peuvent avoir diverses origines : pour quelques rares régions, elles proviennent de la série de référence, de qualité médiocre (très faible variabilité interannuelle, années successives égales).

La représentation spatiale a permis de fournir des hypothèses sur l'origine de certains écarts observés dans des situations géographiques particulières :

les zones étroites ou les bordures de reliefs assez marqués (plateaux et vallées), les régions petites à l'intérieur d'un département, toutes représentant une variabilité réelle,

les zones d'altitude variable (Sud des Alpes) où la pluviométrie est particulièrement hétérogène et l'interpolation régionale peut-être insuffisante.

Par ailleurs, l'examen de quelques exemples d'évolution de la production au cours de l'année montre que les faibles niveaux de production proviennent soit de fortes sécheresses d'été, soit de retards acquis dès le printemps. Dans ce cas, les informations dont nous disposons (évolution de l'indice foliaire et de la matière sèche présente, nous permettant de déduire les dates de coupe) nous montrent que les températures ne sont pas particulièrement basses, mais ces productions faibles semblent liées à des niveaux de stress azoté restés forts plus longtemps, ce qui pourrait provenir d'un ralentissement de la minéralisation, lui-même lié à une sécheresse précoce du sol. Cela permet d'expliquer les biais systématiques entre les 2 types d'estimations qui apparaissent certaines années.

Le bilan de la comparaison est globalement satisfaisant puisque, sauf exceptions explicables, les écarts moyens restent relativement faibles.

### **Références complémentaires**

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.

RUGET F., CLASTRE P., RABAUD V., Validating a crop model applied at a regional scale: the experience of ISOP. soumis à Agronomie.

RUGET F., DELECOLLE R., LE BAS C., DURU M., BONNEVIALE N., RABAUD V., DONET I., PERARNAUD V., PANIAGUA S., 2001. L'estimation régionale des productions fourragères. Colloque Ager-Mia, 31 août 2000, Cirad, Montpellier, in Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, Malézieux, Trebui, Jaeger ed, 263-282, CIRAD-INRA ed.

TIERS N., 1998. Participation à la modélisation de la production fourragère à l'échelle nationale. Rapport d'activité, 38p.-annexes, INRA, Bioclimatologie, Avignon.

# BIBLIO

## BIBLIOTICS

### 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*.

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., 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., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussièrè, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillère, F. Maraux, F. B. Seguin, H. Sinoquet, 2002. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332

- 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.
- Delphin J-E., 2000. Estimation of nitrogen mineralization in the field from incubation test and from soil analysis. *agronomie*, 20 (4), 349-362.
- 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.
- Levrault, F., Ruget, F. 2002. COGITO. Cogito, un modèle pour l'irrigation du maïs *In Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*, In *Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*, 281-300, CIRAD, Collection Repères, Malézieux, Trébuil, Jaeger ed.,
- 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 Congreso Latino-americain 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.
- Prévo, L., Chauki, H., Troufleau, D., Weiss, M., Baret, F., and Brisson, N. (2000). Assimilating optical and radar data into the STICS model for wheat crops: preliminary results. *Physics and chemistry of the Earth*, submitted.
- Prévo, L., Chauki, H., Troufleau, D., Weiss, M., Baret, F., and Brisson, N. (2000). Coupling the STICS canopy functioning model to radiative transfer models for assimilating remote sensing data in the solar and radar domains. *Physics and chemistry of the Earth*, submitted.
- Ruget, F., Brisson, N., Delecolle, R., Faivre, R., 2002 Sensitivity analysis of a crop simulation (STICS) in order to determine accuracy needed for parameters. *Agronomie*. 22, 133-158.
- Ruget, F., Delécolle, R., Le Bas, I., Duru, M., Bonneville, N., Rabaud, E., Donet, I., Péarnaud, 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
- 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.

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. Thèse 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.

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. Thèse 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.

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)

(Travail de fin d'études/F/cote ENGEES : TFE/2001-47)

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 changement climatique sur la demande en eau et la production agricole dans la basse vallée de la Drôme. Rapport du projet GICC "Gestion des impacts du changement climatique dans le Bassin Versant du Rhône, 59 p.

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 6 Rapport d'étape (40 pp)

Grosbuis P. Analyse de sensibilité d'un modèle de prédiction de rendement. ENSA Rennes (Ingénierie 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 (Ingénierie 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 oeuvre. 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).

Jacqueson, S. (2000). Suivi de la croissance et du développement de la luzerne à l'aide du modèle STICS. Mémoire de BTSA Technologie Végétale, Lycée d'Aix-Valabre; INRA Bioclimatologie Avignon, 60 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

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).

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.

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 remotos 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 ó Sciences de la terre et de l'eau, 205 P + annexes.
- 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 Montpellier II ó 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 óintégration 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.
- Pierre P., 2001. Utilisation et adaptation de STICS pour la prévision du drainage dans les sols gonflants drainés des Marais de l'ouest. Mémoire de fin d'étude Institut Supérieur Agricole de Beauvais, 52 p + annexes.
- Pindard A., 2000. La relation stress hydrique-rendement du maïs en Bresse : quelle perspective de spatialisation ? Utilisation d'un simulateur de culture (STICS), Mémoire d'ingénieur d'agronomie, ENESAD, Dijon, 60 p. +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 d'étude de l'ENSAR, 54 p +annexes.
- Quéré L., 1999. Contribution à l'évaluation des modèles d'indice foliaire, de biomasse aérienne et de composantes du rendement de STICS blé, DAA ENSA Rennes
- Rabier P., juin 2000. Développement d'une plate-forme de couplage d'un programme de désagrégation d'images satellite avec un simulateur de cultures. Mémoire d'ingénieur CNAM en informatique (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 (Statistique 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 maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates. Application à l'aquifère des Calcaires de Beauce (site de Villamblain). Thèse de docteur de l'Université d'Orléans, 358 pp

Smith P. 2001. Adaptation de STICS à la canne à sucre. mémoire DAA ENSA Rennes

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

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.

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.

Brisson N., Ruget F., Jeuffroy M.H., Dorel M., Gay J.P., 1999 Evaluation of the genericity of the STICS model. Workshop on crop modelling, Lerida, juin 1999

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. Workshop on crop modelling, Lerida, juin 1999

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., Seguin B., Prevo L., Durr C., Cellier P., Richard G., 2002 About the crop temperature as simulated by the STICS model, ESA conference (Cordoue)

Chauki, H., Prévot, L., Troufleau, D., Brisson, N., Olioso, A., Baret, F., and Guérif, M. (1999, June 26-29). Assimilation of ERS and RadarSat SAR observations within the STICS crop growth model. Paper presented at the CEOS-SAR, Toulouse.

Debaeke, P., Burger, P., Brisson, N. 2001. A simple model to simulate N<sub>2</sub> 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.

Donet I., Ruget F., Rabaud, V., Péronnaud V., Delécolle R., Bonneville N., 1999. ISOP: an integrated system to real-time assessment of forage production variability over France. ECAM 99, Nordköping.

Dorsainvil, F., Brisson, N., Ripoche, D., Thiébau, P., Justes, E., 2001. Adaptation and evaluation of the soil-crop model STICS for catch crops : a tool to compare catch crop management effects on nitrate leaching. Proceedings of the 11<sup>th</sup> 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

Justes, E., Dorsainvil, F., Brisson, N., Ripoche, D., Thiébau, 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.

Monestiez P., Couralt D., Allard D., Ruget F., 1999. Spatial interpolation of climatic data taking into account environment of weather stations and application to a crop model. Conference spatial statistics for production ecology. 19-21 april 1999, Wageningen.

Morvan T, Alard V et Ruiz L 1999 Evaluation comparée des risques de pollution azotée en rotation de type herbager. *Actes du colloque Systèmes Terre et Eau*. Saint Brieu 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.

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 (VIIth region of Chile). XXVIth International Horticultural Congress and Exhibition, 11-17 August, Toronto, Canada

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.

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)

## Liste des participants



nom	prénom	institut	email	tel
BANCAL	Marie-Odile	INRA	mobancal@grignon.inra.fr	01 30 81 55 46
BARET	Frederique	INRA -CSE	baret@avignon.inra.fr	04-32-72-23-63
BEAUDOIN	Nicolas	INRA-unité d'agronomie Laon-Reims-Mons	beaudoin@laon.inra.fr	03.23.23.64.82
BONDEAU	Alberte	PIK Potsdam Institut für Klimafolgenforschung	alberte.bondeau@pik-potsdam.de	493 312 882 546
BOSSENO	Roland	IRD	rbosseno@avignon.inra.fr	04 32 72 24 18
BRESSOUD	Frederique	INRA	bressoud@ensam.inra.fr	04-68-37-74-04
BRISSON	Nadine	INRA	brisson@avignon.inra.fr	04 32 72 23 83
BRUGUIER	Nadine	INRA	bruguier@avignon.inra.fr	04-32-72-23-98
CAROLLE	Michel	ITB	cariolle@institut-betterave.asso.fr	01 42 93 31 80
CASTEL	Thierry	ENESAD	t.castel@enesad.fr	03 80 77 28 69
CHAMPOLIVIER	Luc	CETIOM	champolivier@cetiom.fr	
CLOUVEL	Pascal	CIRAD	clouvel@cirad.fr	04-37-63-62-52
CORBEELS	Marc	CIRAD- Gec Embrapa-cpac	marc.corbeels@cirad.fr	55(61)388-98-12
CORRE	Guénaëlle	ESA	g.corre@esa-angers.educagri.fr	02-41-23-55-55
CROZAT	YVES	ESA	y.crozat@esa-angers.educagri.fr	02.41.23.55.48
De Noblet	Nathalie	DSM/LSCE Labo des sciences du climat et de l'envir.	noblet@lsce.saclay.cea.fr	01-69-08-77-26
DEBAEKE	Philippe	INRA - Agronomie	debaeke@toulouse.inra.fr	06-61-28-50-16
DEDIEU	Gérard	CESBIO	gerard.dedieu@cesbio.cnrs.fr	05 61 55 85 26
DELPHIN	Jean-Emmanuel	INRA Colmar	delphin@colmar.inra.fr	
DENUX	Jean-pierre	Labo de teledetection	jpdenux@esa-purpan.fr	05-61-15-30-82
DESFONDS	Veronique	INRA unité CSE	desfonds@avignon.inra.fr	04-32-72-23-76
DI BELLA	Carlos Marcelo	INTA	cdibella@cni.inta.g	5,41E+16
DOMERGUE	Marjorie	INRA	domergue@avignon.inra.fr	04 32 72 23 75
DORMEGNIES	Thomas	CITFL	dormegnies@ctifl.fr	04-66-01-10-54
DUPRAZ	Christian	INRA - UMR system	dupraz@ensam.inra.fr	04-99-61-23-39
DURR	Carolyne	INRA Unité d'Agronomie	durr@laon.inra.fr	03 23 23 64 80
FLENET	Francis	Agro-Transfert Picardie	francis.flenet@alternattech.org	03 22 85 75 77
GABRIELLE	Benoit	INRA - UMR Environnement et grandes cultures	benoit.gabrielle@grignon.inra.fr	01-30-81-55-51
GARCIA de CORTAZAR	Iñaki	INRA-Agroclim	igarcia@avignon.inra.fr	432722375
GARS	Chantal	INRA - CSE	gars@avignon.inra.fr	04-32-72-23-6?
GARY	Christian	INRA, UMR SYSTEM	gary@cirad.fr	467616559
GATE	Philippe	Arvalis-institut du vegetal	pgate@itcf.fr	01-30-12-96-28
GAUDILLERE	Jean-Pierre	INRA	gaudillere@bordeaux.inra.fr	

GAY	Frédéric	CIRAD	frederic.gay@cirad.fr	467615878
GERMAIN	Nicolas	IRD CLIFA	germain@mpl.ird.fr	
GERVOIS	Sebastien	LSCE	gervois@lsce.saclay.cea.fr	01 69 08 86 93
GODARD	Caroline	INRA UMR Economie Publique Grignon	caroline.godard@grignon.inra.fr	01 30 81 53 43
GOMEZ	Eric	Ecole des Mines - CIG	gomez@cig.ensmp.fr	01 64 69 49 09
GOUTOULY	J.Pascal	INRA - Agronomie	gaudillere@bordeaux.inra.fr	
GUERIF	Martine	INRA	mog@avignon.inra.fr	
GUICHARD	Laurence	INRA	guichard@grignon.inra.fr	01 30 81 52 43
GUINOT	Jean-pierre	INRA - CSE	jpg@avignon.inra.fr	04-32-72-23-65
GUY	Karine	CIREF	guy@ciref.asso.fr	05-53-22-15-10
HADRIA	Rachid	Faculté des sciences Semlalia- Marrakech-Maroc	r.hadria@ucam.ac.ma	21262494321
HOULES	Vianney	INRA Laon	houles@laon.inra.fr	04-32-72-24-18
ISBERIE	Carole	Cemagref	carole.isberie@cemagref.fr	442669944
JAYET	Pierre-Alain	INRA	jayet@grignon.inra.fr	01 30 81 53 49
JUIN	Stéphanie	INRA d'Avignon	juin@avignon.inra.fr	04/32/72/24/05
JUSTES	Eric	INRA	justes@toulouse.inra.fr	05 61 28 52 50
LANGLAIS	CHRISTIAN	CIRAD FLHOR	christian.langlais@cirad.fr	0596 42 30 70
LARMURE	Annabelle	ENESAD	a.larmure@enesad.fr	03 80 69 33 34
LAUNAY	Marie	INRA -CSE	bmp.launay@wanadoo.fr	
LEBAS	Christine	INRA - infosol	le_bas@orleans.inra.fr	02 38 41 78 43
LEBONVALLET	sophie	INRA-CSE-batiment climat	lebonval@avignon.inra.fr	
LECOMPTE	Francois	INRA-PSH	lecompte@avignon.inra.fr	04-32-72-23-03
LECOMTE	Isabelle	INRA - UMR system	lecomte@ensam.inra.fr	04-99-61-25-52
LEVRAULT	Frederic	Agro-Transfert Poitou-Charentes	frederic.levrault@poitou-charentes.chambragri.fr	05-49-55-61-72
LUSA	Odile	INRA - CSE	lusa@avignon.inra.fr	04-32-72-22-90
MAILHOL	Jean-claude	Cemagref	jean-claude.mailhol@cemagref.fr	04-67-04-63-46
MARTINEZ	Anne-Marie	CIRAME	martinez-am@cirame.asso.fr	490639055
MARY	Bruno	INRA Agronomie	mary@laon.inra.fr	03.23.23.64.83
MAUPAS	Fabienne	institut Technique de la Betterave	maupas@institut-betterave.asso.fr	142937338
MAYUS	Martina	INRA - UMR system	mayus@ensam.inra.fr	
MESTRIES	Emmanuel	CETIOM	mestries@cetiom.fr	01-30-79-95-55
MINETTE	Sebastien	Agro-Transfert Poitou-Charentes	sebastien.minette@poitou-charentes.chambragri.fr	05-49-55-61-74
MUNIER-JOLAIN	Nicolas	INRA - Malherbologie et Agronomie	munierj@dijon.inra.fr	03 80 69 30 35
NESME	Thomas	INRA-PSH	thomas.nesme@avignon.inra.fr	04 32 72 24 56
NICOLARDOT	Bernard	INRA agronomie Reims	nicolard@reims.inra.fr	03 26 77 35 83
OLIVIER	Roselyne	INRA - CSE	rolivier@avignon.inra.fr	04-32-72-23-60
OORTS	Katrien	INRA - Unité d agronomie de Laon-Reims-Mons	katrien.oorts@reims.inra.fr	03 26 77 35 88
ORO	Franck	INRA -CSE	foro@avignon.inra.fr	
PONSON	Sophie	CIREF	ponson@ciref.asso.fr	05-53-22-15-10

POUPA	Jean-Claude	INRA Economie	poupa@roazhon.inra.fr	02 23 48 54 05
RAMEL	Jean-Pierre	CIRAME	ramel-jp@cirame.asso.fr	490639056
RAMILLON	Delphine	INRA Angers Unité vigne et vin	ramillon@angers.inra.fr	06.80.28.14.26 . ou 02.41.22.56.71
RAYNAL LACROIX	Christiane	CTIFL	raynal@ctifl.fr	05 53 58 00 05
RECOUS	Sylvie	INRA Unité d'agronomie	recous@laon.inra.fr	03 23 23 64 79
RIPOCHE	Dominique	INRA - CSE	domi@avignon.inra.fr	432722384
RUELLE	Pierre	Cemagref	pierre.ruelle@cemagref.fr	04-67-04-63-47
RUGET	Francoise	INRA -CSE	ruget@avignon.inra.fr	04-32-72-23-99
SAPPE	Gilbert	INRA	gis@avignon.inra.fr	49032722366
SAUBOUA	Emmanuel le	INRA Rennes - UMR SAS	sauboua@roazhon.inra.fr	02 23 48 54 38
SCHLEGEL	Vincent			
SCHNEBELEN	Christine	INRA - infosol	nathalie.schnebelen@orleans.inra.fr	02-38-41-78-50
SEGUIN	Bernard	INRA	seguin@avignon.inra.fr	04 32 72 23 07
SIERRA	Jorge	INRA Antilles-Guyane	sierra@antilles.inra.fr	05-90-25-59-49
SMITH	Pascalie	PIK	pascalie.smith@pik-potsdam.de	+49 331 288 25 50
SURLEAU	Caroline	Alternattech Agro-Transfert	caroline.surleau@alternattech.org	03 22 85 75 79
THIEBEAU	Pascal	INRA Unité d' Agronomie	thiebeau@reims.inra.fr	326773589
TOURINO	Ignacio	Labo de teledetection	tourino@esa-purpan.fr	05-61-15-30-87
TOURNEBIZE	Julien	CEMAGREF	julien.tournebize@cemagref.fr	01 40 96 60 38
TOURNEBIZE	Regis	INRA Antilles-Guyane	tournebi@antilles.inra.fr	05-90-25-59-76
TREMBLAY	Marie	INRA Toulouse - Unité d'Agronomie	tremblay@toulouse.inra.fr	05 61 28 50 39
VALANTIN-MORISO	Muriel	INRA	morison@grignon.inra.fr	01 30 81 52 38
VALDES GOMEZ	Héctor	INRA - Unité de Bioclimatologie	hector.val@voila.fr	490273478
WAGNER	Dominique	CETIOM	wagner@cetiom.fr	01-30-79-95-62
WALLACH	Daniel	INRA - Agronomie	wallach@toulouse.inra.fr	05-61-28-50-16
ZANOLIN	ANNE	Cemagref	zanolin@servaix1.aix.cemagref.fr	04.42.66.99.40