



DEPARTEMENT
ENVIRONNEMENT ET
AGRONOMIE

SEMINAIRE



SAINTE-MONTAINE

17-19 Octobre 2012

COMITE D'ORGANISATION

Pour l'INRA d'Orléans

Christine LE BAS - InfoSol
Marie-Pierre POUSSINEAU - InfoSol
Olivier BERTEL - Centre
Bernard NICOULLAUD – UR Sols
Catherine PASQUIER – UR Sols
Alain COUTURIER – UR Sols
Birama SALL - InfoSol
Christian LE LAY – UR Sols
Sacha DESBOURDES – InfoSol

Pour le Groupe Référents Stics

Nicolas BEAUDOIN
Samuel BUIS
Jean-Louis DURAND
Iñaki GARCIA de CORTAZAR-ATAURI
Eric JUSTES
Marie LAUNAY
Christine LE BAS
Bruno MARY
Dominique RIPOCHE
Françoise RUGET

SOMMAIRE

Programme du séminaire stics 2012	6
SESSION 1	9
French contribution to the international AgMIP project: leading maize pilot and STICS simulations for wheat, maize and rice	10
Simona Bassu, Jean-Louis Durand, Giacomo de Sanctis, Dominique Ripoche, Françoise Ruget, Samuel Buis, Patrick Bertuzzi	
Proposition d'une évaluation globale du modèle Stics	12
Elsa Coucheney, Marie Launay, Samuel Buis, Dominique Ripoche, Bruno Mary, Nicolas Beaudoin, Françoise Ruget, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, Eric Justes, Julie Constantin, Joël Léonard	
Comparaison des modèles Stics, DNDC et Daycent pour prédire la dynamique de l'azote du blé de printemps dans l'Est du Canada	15
Julie Sansoulet, Elizabeth Pattey, Guillaume Jégo, Roland Kroebel, Brian Grant, Ward Smith	
SESSION 2	19
Impacts environnementaux carbone et azote des systèmes de cultures: nouveaux développements dans ModuloStics	20
Bruno Mary, Elsa Coucheney, Joël Léonard, Marie Launay	
Introduction de la notion de dynamique de talles pour un couvert de graminées pérennes et quelques autres modifications concernant les prairies	23
Françoise Ruget, François Lelièvre, Florence Volaire, Nadine Brisson, Dominique Ripoche, Marie Launay, Sylvain Satger	
Développement d'un modèle de maladies fongiques aériennes couplé au modèle de culture Stics	26
Julie Caubel, Marie Launay, Dominique Ripoche, Nadine Brisson	
Modulostics : utilisation sous l'interface homme-machine JavaStics et implémentation sous la plate-forme Record	29
Dominique Ripoche, Julien Cufi, Hélène Raynal, Patrick Chabrier, Eric Casellas	
SESSION 3	33
Simulation de l'impact des cultures intermédiaires sur la lixiviation de nitrate, le drainage et le rendement de la culture suivante dans divers pédoclimats français.....	34
Julie Constantin, Eric Justes	
Couplage d'une base de données à long terme avec les modèles Swat et Stics en vue de les tester et de simuler des scénarios de gestion de l'azote.....	38
Mathieu Deneufbourg, Nicolas Pugeaux, Jean Huguet, Claire Billy, Jérôme Duval, Christophe Vandenberghe, Jean-Marie Marcoen, Nicolas Beaudoin	
Intégration du transfert des pesticides dans Stics : comparaison de résultats obtenus sur différents sites.....	41
Hélène Blanchoud, Wilfried Queyrel, Frederik Van Den Berg, Florence Habets	
Simulation des émissions de N ₂ O par les sols : propositions d'amélioration de ModuloStics et évaluation préliminaire	43
Joël Léonard, Nicolas Beaudoin, Michel Cariolle, Jean-Pierre Cohan, Cécile Le Gall, Bruno Mary, Elisabeth Pattey, Yves Python	
SESSION 4	47
Agrosystèmes et changement climatique à l'échelle continentale : le point de vue de climatologues	48
Nathalie de Noblet, Nicolas Vuichard	

Estimation des propriétés des sols par inversion du modèle Stics	50
Sreelash Krishnan Kutty, Muddu Sekhar, Laurent Ruiz, Samuel Buis, Martine Guérif, Sat Kumar Tomer, Soumya Bandyopadhyay, Patrick Durand, Chantal Gascuel-Oudou, Françoise Ruget	
Performance de Stics à prédire la productivité du maïs grain en réponse aux variations climatiques dans l'Est du Canada. 1) réinitialisation à l'aide du LAI extrait de Landsat pour prédire des rendements spatialisés ; 2) simulation de la réponse à la fertilisation azotée	53
Elizabeth Pattey, Guillaume Jégo, Julie Sansoulet, Jianguo Liu, Isabelle Duchesne, Nicolas Tremblay, Nicolas Beaudoin	
Multisimulations Stics sur des territoires régionaux pour caractériser la production végétale et les échanges hydriques avec le milieu.....	56
André Chanzy, Philippe Clastre, Sébastien Garrigues, Albert Oliosio, Hélène Raynal	
SESSION POSTERS	59
Adaptation de Stics à la culture de canola au Canada à partir du module colza en vue de simuler les émissions de N ₂ O par ModuloStics	60
Nicolas Beaudoin, Julie Sansoulet, Elizabeth Pattey, Cynthia Grant, Robert Blackshaw, Neil Harker, Eric Johnson, John O'Donovan, Sébastien Gervois	
Evaluation des pertes en nitrate dans différents systèmes de culture avec le modèle Stics	64
Carole Bécel, Nicolas Munier-Jolain, Bernard Nicolardot	
Bilan sur les flux d'azote de scénarii d'épandages de produits résiduels organiques à l'échelle de la succession de cultures.....	65
Enguerrand Burel, Ahmed Karim Dhaouadi, Virginie Parnaudeau, Nouraya Akkal, Xavier Heudelot, Christine Aubry, Sabine Houot	
Etude des risques de lixiviation nitrique liés aux épandages d'automne avant semis de blé d'hiver : le cas du fumier de bovin et du fumier de volaille	67
Enguerrand Burel, Fabienne Butler, Virginie Parnaudeau, Julie Constantin, Eric Justes	
Développement d'indicateurs écoclimatiques de la faisabilité des cultures dans un contexte de changement climatique.....	71
Julie Caubel, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, Frédéric Huard, Marie Launay, Dominique Ripoché	
Calibration et évaluation de cultures intermédiaires de moutarde, ray-grass italien et vesce pour le modèle Stics.....	74
Julie Constantin, Eric Justes	
Un premier pas vers un système de prédiction du rendement en temps réel ?	78
Benjamin Dumont, Salvador Ferrandis, Vincent Leemans, Bernard Bodson, Jean-Pierre Destain, Marie-France Destain	
Impact des incertitudes lors de l'estimation spatialisée des paramètres sols du modèle Stics - Questions méthodologiques	81
Christine Le Bas, Yves Coquet, Marion Bardy, Robert Faivre, Martine Guérif, Florence Habets, Isabelle Cousin	
Calibration et évaluation de la performance du modèle Stics pour simuler la croissance et la valeur nutritive de la fléole des prés.....	83
Guillaume Jégo, Gilles Bélanger, Gaëtan F. Tremblay, Qi Jing, Elizabeth Pattey	
Faisabilité et pertinence de l'estimation par Stics des émissions d'azote réactif de la culture de tomate de contre-saison au Bénin dans le cadre ACV	86
Aurélie Perrin, Claudine Basset-Mens	
Simulation prospective du drainage et des rendements des prairies irriguées à l'échelle de l'aquifère de la Crau	89
Rémi Lecerf, André Chanzy, Albert Oliosio, Rachid Hadria, Françoise Ruget, Patrice Lecharpentier	

Test du modèle Stics pour la simulation d'une culture pérenne, cas de <i>Miscanthus x giganteus</i> : Atouts et limites du modèle et propositions d'amélioration.....	93
Loïc Strullu, Nicolas Beaudoin, Marie-Hélène Jeuffroy, Bruno Mary	
Révision et évaluation du module de fertilisation automatique de Stics en vue de simuler des scénarios de gestion de l'azote	96
Marie-Laure Berthommé, Bruno Mary, Nicolas Pugeaux, Beaudoin Nicolas	
Adaptation of crop model Stics for the flooded rice (<i>Oryza sativa</i>).....	99
Kamran Irfan, Françoise Ruget, Samuel Buis, Fabienne Trolard	
Conception de prototypes de systèmes de culture intégrés à bas niveaux d'intrants : premier retour du projet ANR MicMac-Design.....	103
Hélène Raynal, Jean-Noël Aubertot, Jennifer Baudet, Jacques-Éric Bergez, Éric Casellas, Patrick Chabrier, Marie Launay, Dominique Ripoché, Grégory Véricel, Éric Justes	
Elaboration d'indicateurs de pertes de rendement dues à la rouille brune du ble à l'aide du modèle couplé Stics-Mila et de méta-modèles dérivés	107
Serge Zaka, Marie Launay, Julie Caubel, Dominique Ripoché, David Gouache	
Liste des participants.....	111

PROGRAMME DU SEMINAIRE STICS 2012

Mardi 16 octobre 2012	
18h30 – 21h00	Accueil
21h00	Repas
Mercredi 17 octobre 2012	
Session plénière – salle George Sand	
8h30-9h15	Introduction C. Le Bas et B. Nicoulaud - Inra d'Orléans N. Beaudoin et M. Launay - animateurs GRS
9h15-10h00	Exposé introductif E. Justes
10h00-10h30	Pause
10h30-12h00	Session 1 : Comparaison de modèles internationaux et évaluation de Stics (performances, domaine de validation) Animateur : I. Garcia de Cortazar-Atauri 10h30-11h15 <i>Contribution française au programme de recherche international AgMIP : pilotage du projet maïs et simulation Stics pour blé, maïs et riz</i> S. Bassu, F. Ruget, G. de Sanctis, 11h15-11h45 <i>Proposition d'une évaluation globale du modèle Stics</i> E. Coucheney 11h45-12h00 <i>Comparaison des modèles Stics, DNDC et Daycent pour prédire la dynamique de l'azote du blé de printemps dans l'Est du Canada</i> J. Sansoulet
12h00-13h30	Repas
13h30-14h30	Session 2 : Nouveaux formalismes intégrés à la version ModuloStics et nouveaux développements en cours Animateur : E. Justes 13h30-14h00 <i>Impacts environnementaux carbone et azote des systèmes de cultures : nouveaux développements dans ModuloStics</i> B. Mary 14h00-14h15 <i>Introduction de la notion de dynamique de talles pour un couvert de graminées pérennes et quelques autres modifications concernant les prairies</i> F. Ruget 14h15-14h30 <i>Développement d'un module de maladies fongiques aériennes couplé au modèle Stics</i> J. Caubel 14h30-15h25 <i>ModuloStics : utilisation sous l'interface homme-machine JavaStics et implémentation sous la plate-forme Record</i> D. Ripoche, J. Cufi et H. Raynal 15h25-15h30 <i>introduction posters</i>
15h30-16h30	Session posters et pause
16h30-18h00	Session 3 : Applications de Stics aux problématiques environnementales (nitrates, pesticides, gaz à effet de serre, etc.) Animateur : N. Beaudoin 16h30-16h35 <i>Introduction</i> N. Beaudoin 16h35-16h55 <i>Simulation de l'impact des cultures intermédiaires sur la lixiviation de nitrate, le drainage et le rendement de la culture suivante dans divers pédoclimats français</i> J. Constantin 16h55-17h15 <i>Couplage d'une base de données à long terme avec les modèles Swat et Stics en vue de les tester et de simuler des scénarios de gestion de l'azote</i> M. Deneufbourg 17h15-17h35 <i>Intégration du transfert des pesticides dans Stics : comparaison de résultats obtenus sur différents sites</i> H. Blanchoud

17H35-17h55	<i>Simulation des émissions de N₂O par les sols : propositions d'amélioration de ModuloStics et évaluation préliminaire</i> J. Léonard
17h55-18h00	<i>Discussion</i>
Mercredi 17 octobre 2012	
Tables rondes – salles George Sand, Hugo Labiche et Alain-Fournier	
18h00-19h00	Tables rondes (3 groupes) <i>Quelles sont les attentes des économistes vis-à-vis des modèles de culture ?</i> Animateurs : N. Beaudoin + J.-C. Poupa <i>Stics et l'intensification écologique</i> Animateurs : E. Justes + V. Parnaudeau <i>Changement climatique et simulation à long terme</i> Animateurs : I. Garcia de Cortazar-Atauri + S. Buis
20h00	Repas suivi d'une soirée dansante
Jeudi 18 octobre 2012	
Session plénière – salle George Sand	
8h30-10h00	Session 4 : Contribution de Stics à des problématiques de changement d'échelle ou de couplage Animateur : M. Launay
8h30-9h00	<i>Agrosystèmes et changement climatique à grande échelle : le point de vue de climatologues</i> N. de Noblet
9h00-9h20	<i>Estimation des propriétés des sols par inversion du modèle Stics</i> S. Buis
9h20-9h40	<i>Performance de Stics à prédire la productivité du maïs grain en réponse aux variations climatiques dans l'Est du Canada</i> E. Pattey
9h40-10h00	<i>Multisimulations Stics sur des territoires régionaux pour caractériser la production végétale et les échanges hydriques avec le milieu</i> A. Chanzy
10h00-10h30	Pause
10h30-11h00	Restitution des tables rondes
11h00-11h45	Assemblée Générale des utilisateurs de Stics : débat sur les priorités Animateurs : N. Beaudoin et M. Launay
11h45-12h00	Clôture du séminaire Animateur GRS G. Richard - Département EA
12h00-13h30	repas et/ou départ
Jeudi 18 octobre 2012	
Ateliers – salles George Sand, Hugo Labiche 1 & 2	
13h30-15h30	Ateliers par groupes : <ul style="list-style-type: none"> formation à ModuloStics et JavaStics (Animateurs : D. Ripoché, M. Launay, J. Cufi et I. Garcia de Cortazar-Atauri) présentation de ModuloStics sous Record (Animateurs : H. Raynal et E. Casellas) présentation des outils OptimiStics et MultiSimLib (Animateurs : S. Buis et P. Lecharpentier)
15h30-16h00	pause
13h30-15h30	Ateliers par groupes : <ul style="list-style-type: none"> formation à ModuloStics et JavaStics présentation de ModuloStics sous Record présentation des outils OptimiStics et MultiSimLib
18h30-19h30	Dégustation de vins de la région
20h00	repas

Vendredi 19 octobre 2012 Ateliers – salles George Sand, Hugo Labiche 1 & 2	
9h30-11h30	Ateliers par groupes : <ul style="list-style-type: none">• formation à ModuloStics et JavaStics• présentation de ModuloStics sous Record• présentation des outils OptimisStics et MultiSimLib
12h00-13h30	repas puis départ

SESSION 1

Comparaison de modèles internationaux et évaluation de Stics (performances, domaine de validation)

Animateur : I. Garcia de Cortazar-Atauri

FRENCH CONTRIBUTION TO THE INTERNATIONAL AGMIP PROJECT: LEADING MAIZE PILOT AND STICS SIMULATIONS FOR WHEAT, MAIZE AND RICE

Simona Bassu^{1,2}, Jean-Louis Durand³, Giacomo De Sanctis⁴, Dominique Ripoche⁴, Françoise Ruget⁵, Samuel Buis⁵, Patrick Bertuzzi⁴

¹ INRA, UMR 211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

² AgroParisTech, , UMR 211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

³ INRA, UR0004 P3F, F-86600 Lusignan, France.

⁴ INRA, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

⁵ INRA, UMR 1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

Mots-Clés:

Intercomparaison de modèle, changement climatique

Simulation models can be used as strategic tools for evaluating the consequences of climate change on crop production and for evaluating possible adaptations of crop management practices. As many different crop models are available, it is important to compare several models in order to improve model functions and to assess uncertainties in the predicted crop response to climate change factors. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) is a distributed simulation exercise for agricultural model intercomparison and future climate change assessments with participation from multiple crop and economic modelling groups around the world.

The goal of AgMIP is:

- To provide reasonable estimates of the impacts of climate change on crop yields of important crops of the world.
- To evaluate the uncertainty that comes from using different models in various climate and crop management situations and understand the causes of the different model responses to climate change factors.
- To improve our capacity for simulating the response of crops to yet unknown climates (combinations of extreme drought, temperatures and atmospheric CO₂ concentrations).

The exercises are conducted in organized teams per crop. Four crop pilots (wheat, rice, maize, sugarcane) were formed in 2011. Teams for potato, sorghum, peanut, and soybean were formed at the beginning of 2012.

The work consists in testing model output sensitivity to climatic factors over a large ensemble of crop models and across four sentinel sites that are important contrasting pedoclimatic zones of crop production.

Here we present the French contribution in the AgMIP project to lead the multiple modelling groups of the maize pilot project and to run the STICS simulation exercises for maize, wheat and rice crops. In all the pilot projects, the modelling groups are involved to run their models at the four sites characterized by contrasting conditions. Measured daily weather records from 1980 to 2010 and a 30-year A2-End-of-Century scenario were used for each location. In addition, models were run with the 30-year manipulated weather files in order to compare their sensitivity to temperature, CO₂, rainfall and/or management modifications.

Each pilot project was conducted in four main steps:

1. In the first step, called 'initial uncalibrated model simulations', modellers were provided by daily weather data, soil characteristics, management and elementary cultivar information (including anthesis and maturity dates) from the field experiments of each location. Simulations were

conducted using those limited inputs: the management was replicated across the 30-year weather data in each location and no other changes were applied to the model (i.e. default parameter values were used). For maize, standard values of initial nitrogen conditions were provided on the basis of the previous crop (legumes or cereals) and the soil type (high or low organic matter), or following the literature and the expert knowledge. The starting date of simulations were set before sowing, at the end or at the beginning of the rainy season, making the assumption that soil was, respectively, at field capacity or at wilting point. For wheat, measured soil initial conditions were provided. For rice, the transplanting date, the status of the crop at this date and information on soil nitrogen at transplanting were given.

2. In the second step, called 'model calibration', data from the experiments were used for model calibration for each of the four locations. Modellers were supplied with detailed information on measured phenology and time-series data on growth (LAI, biomass, grain), and soil water and nitrogen uptake dynamics, to the extent available from each site. Before and/or after calibration, there was a long-term exercise (30 years in the present and the future). For these simulations, initial water and nitrogen conditions were reset each year according to the measured initial values of the experiment. Only for the 30-year simulations of the A2-future scenario, nitrogen application dates were changed according to the shift of the flowering date induced by the temperature increase. For the maize crop in irrigated locations (France and Tanzania), for both the baseline and the future scenario, the irrigation was set by irrigating when soil water content was < 60% of Plant Available Water at 50 cm depth.
3. In the third step called 'sensitivity analyses', multiple series of weather data were used for the simulation exercises to evaluate the sensitivity of the different models to multiple combinations of temperatures, atmospheric CO₂ concentrations, precipitation and crop management change (i.e. -3°C up to +9°C, 360 ppm up to 750 ppm of CO₂, -50% up to +50% of precipitations, 0 up to 150% of the nitrogen application at the specific locations).
4. In the fourth step called 'GCM scenarios' (not yet finished for all the pilot projects), multiple series of future weather data were created following different Global Climate Models (GCM) scenarios. All those series were used for the simulation exercises to evaluate the magnitude of the uncertainty due to the GCM scenarios used for the simulation.

The results of all the models are collected and treated by each crop Pilot team, led by S. Asseng in Florida for wheat, by S. Bassu and J.-L. Durand in France for maize and by B. Bouman in the Philippines for rice. First results were shown at the ESA congress held in Helsinki in August 2012, final results will be shown at the AgMIP meeting in Rome and at the ASA congress in Cincinnati.

PROPOSITION D'UNE EVALUATION GLOBALE DU MODELE STICS

Elsa Coucheney¹, Marie Launay², Samuel Buis², Dominique Ripoché², Bruno Mary¹, Nicolas Beaudoin¹, Françoise Ruget², Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri², Eric Justes^{3,4,5}, Julie Constantin^{3,4,5}, Joël Léonard¹

¹ INRA, US 1158 Agro-Impact, F-02000 Barenton, France

² INRA, US 1116 AgroClim, F-84914 Avignon, France

³ INRA, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

⁴ INP, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

⁵ ENSAT, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

Mots-clés :

Evaluation de modèle ; base de données ; diversité agro-environnementale

Introduction

Les modèles de culture sont de plus en plus utilisés comme élément d'une chaîne de modélisation complexe pour simuler le fonctionnement d'agrosystèmes sur de vastes territoires (e.g. bassin versant) et sur le long terme (rotations culturales, test de scénarios). Cela implique de pouvoir considérer une gamme étendue de situations agro-environnementales et de nombreux processus, tout en faisant une large confiance au modèle et à sa paramétrisation faute de pouvoir les vérifier dans tous les cas de figure. Or les évaluations de modèles sont souvent spécifiques d'une situation ou d'une sortie, voire d'une version du modèle lui-même. Disposer d'un ordre de grandeur de la qualité des prédictions de la version standard du modèle Stics (formalismes et paramétrage) pour un large spectre de situations et différentes variables de sortie (production ou environnement) permettrait de fiabiliser les simulations et d'aider à interpréter les éventuelles différences entre scénarios via la comparaison de ces différences avec les erreurs attendues. C'est cette analyse globale des erreurs de simulation que nous avons cherché à réaliser dans ce travail, en nous appuyant sur la compilation de plusieurs ensembles de données expérimentales obtenues dans une gamme variée de contextes.

Matériels et Méthodes

Une base de données a été constituée à partir de 1700 unités de simulations (USMs, i.e. 1 plante x 1 site x 1 année x 1 itinéraire technique) collectées auprès des utilisateurs de Stics. Elle comprend des situations de sol nu et 16 cultures différentes regroupées en 4 groupes (figure 1) : (1) céréales (blé dur, blé tendre, seigle, orge, escourgeon, maïs), (2) protéo-oléagineuses (colza, pois, lin), (3) fourrages et cultures intermédiaires (prairie, luzerne, moutarde, ray-grass italien, radis) et (4) plantes indéterminées (betterave et vigne). Les situations étudiées sont réparties sur 76 sites représentatifs de l'ensemble des zones climatiques de France (figure 1, océanique, mi-océanique, continentale, montagnarde et méditerranéenne) et couvrent 32 années climatiques entre 1978 et 2009. La base de données permet également de balayer différentes modalités de pratiques culturales, notamment en termes de quantité d'engrais azoté apportée. Deux niveaux d'analyse des erreurs ont été distingués :

1- La quantification globale des erreurs du modèle sur l'ensemble de la base de données et pour les différentes variables de sortie (regroupées en 3 types : plante, eau et azote du sol).

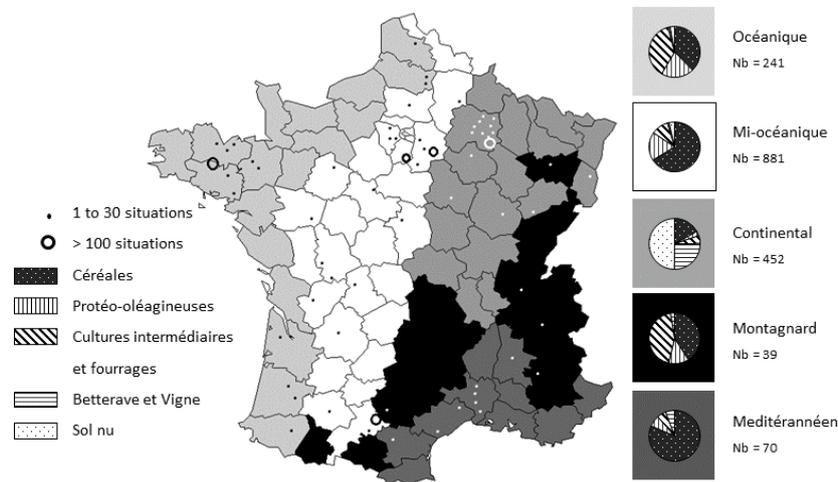
Nous nous sommes appuyés pour cela sur la confrontation graphique des variables observées et simulées et sur des critères statistiques permettant de mesurer la capacité du modèle à restituer la tendance (présence ou pas de biais), à rendre compte de la dispersion (r^2) et à restituer la variabilité des données ($\sigma_{sim}/\sigma_{obs}$).

2- L'analyse de l'effet des conditions agro-environnementales sur l'erreur du modèle.

Nous avons défini dans un premier temps quelques facteurs clés : groupe de plante, classe de teneur

en argile ou en matière organique, ordre de grandeur du rayonnement global reçu, occurrence ou pas de températures minimales et maximales extrêmes, indice de disponibilité en eau et en azote minéral sur la période de culture. Nous avons ensuite réalisé une analyse de variance pour tester l'effet de ces facteurs sur les erreurs du modèle.

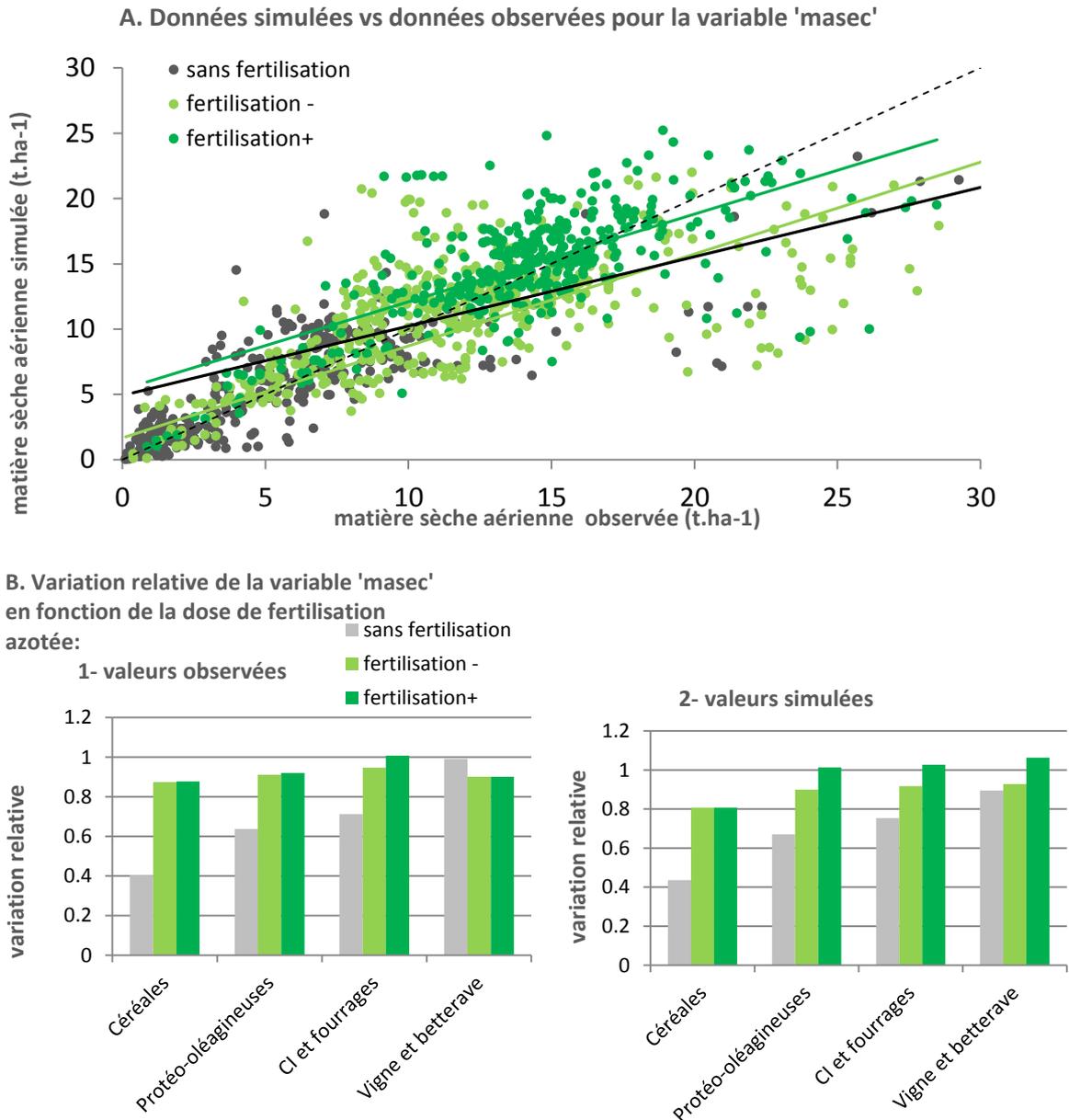
Figure 1 - Représentation géographique des données expérimentales utilisées dans l'évaluation et occurrence des différentes cultures par zone climatique.



Résultats

Les premiers résultats ont permis de mettre en évidence : i) des différences de qualité de prédiction en fonction des sorties considérées, les variables associées à la production étant généralement mieux simulées que les variables environnementales liées à l'azote minéral dans le sol ; ii) le fait que le modèle rend bien compte des différences moyennes induites par des changements de culture, de contexte pédoclimatique ou de pratiques, et iii) que les erreurs sont indépendantes des différents facteurs testés. La figure 2 montre par exemple que la qualité de simulation du rendement végétal ne dépend pas de la dose d'engrais apportée (figure 2A) et que le modèle rend compte des différences observées entre groupes de situations : cultures non fertilisées, cultures fertilisées modérément et fertilisées fortement (figure 2B). La poursuite du travail permettra de prendre en compte les interactions entre les différents facteurs, et la démarche proposée pourrait ensuite être conduite systématiquement à chaque évolution du modèle.

Figure 2 - Qualité de prédiction de Stics pour la variable *masec* (matière sèche aérienne en t ha⁻¹) en fonction de la dose de fertilisation apportée. La figure 2A montre les valeurs simulées en fonction des valeurs observées et la figure 2B montre les différences moyennes relatives entre groupes de fertilisation pour les valeurs observées et simulées respectivement.



COMPARAISON DES MODELES STICS, DNDC ET DAYCENT POUR PREDIRE LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE DU BLE DE PRINTEMPS DANS L'EST DU CANADA

Julie Sansoulet¹, Elizabeth Pattey¹, Guillaume Jégo², Roland Kroebe³, Brian Grant¹, Ward Smith¹
Nicolas Tremblay⁴, Gilles Tremblay⁵

¹ Agriculture et Agroalimentaire Canada, 960 Carling Avenue, Ottawa, ON, Canada K1A0C6

² Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560 Boulevard Hochelaga, Québec, QC, Canada G1V2J3

³ Agriculture et Agroalimentaire Canada, 5403 - 1^{ère} Avenue Sud, Lethbridge, AB, Canada T1J4B1

⁴ Agriculture et Agroalimentaire Canada, 430 Boulevard Gouin, St Jean-Sur-Richelieu, QC, Canada J3B3E6

⁵ CEROM, Centre de recherche sur les grains, 2700 rue Einstein, Sainte-Foy, QC, Canada G1P3W8

Mots clés :

Azote, blé de printemps, Canada, biomasse, modélisation, fertilisation, climat

Introduction

La modélisation des transformations de l'azote dans le sol et de son absorption par les cultures permet d'estimer les taux d'application azotés et d'évaluer la viabilité des pratiques agricoles. Selon Statistique Canada, 340 kt de blé de printemps ont été produites dans les provinces de l'Ontario et du Québec, en 2009, ce qui représente 17 % de la production canadienne. Dans ces zones tempérées, une proportion importante d'engrais azotés appliqués dans les champs cultivés peut être lessivée sous la zone racinaire. En plus de la fertilisation azotée, la distribution et la quantité des précipitations peuvent jouer un rôle important sur la biomasse et le taux d'azote des cultures. Toutefois, l'impact des taux d'application d'azote et des variations climatiques sur la production de blé de printemps et l'absorption d'azote n'a pas été modélisé dans l'Est du Canada. Des simulations ont été menées pour (i) étalonner un cultivar de blé de printemps adapté à l'Est du Canada à l'aide du modèle Stics (Brisson *et al.*, 2003) et évaluer la performance lors de la prédiction du LAI (indice foliaire), de la biomasse et du rendement (Jégo *et al.*, 2010) (ii) évaluer les émissions de gaz à effet de serre provenant des terres agricoles au Canada après l'application d'engrais azotés au moyen du modèle DNDC (Desjardins *et al.*, 2010) et (iii) évaluer la séquestration du carbone dans le sol à l'aide du modèle Daycent (Foereid *et al.*, 2012).

Notre objectif est d'évaluer la performance des modèles Stics, DNDC (dénitrification décomposition, Li *et al.*, 1992) et Daycent (modèle Century quotidien, Parton *et al.*, 1998) pour simuler les variables impliquées dans la détermination de l'efficacité de l'utilisation de l'azote appliqué sur le blé de printemps dans l'Est du Canada. Cette étude se concentre sur la réponse de la biomasse végétale et l'absorption d'azote à différents taux d'application sur plusieurs saisons de croissance et sur plusieurs sites pour saisir l'influence des variations climatiques. Nos hypothèses sont les suivantes : (i) les variations de la pluviométrie ont une plus grande influence sur la biomasse potentielle que les taux d'application des engrais azotés, (ii) les modèles sont capables de prédire les variations interannuelles de la biomasse et de l'absorption d'azote.

Matériel et méthodes

Une base de données composée de 9 années distribuées entre 1993 et 2008 dans trois sites de l'Est du Canada a été utilisée pour calibrer et évaluer les modèles Stics, DNDC et Daycent (tableau 1) afin de prédire l'absorption d'azote et la biomasse du blé de printemps (*Triticum aestivum* L.) en réponse à l'application d'azote. L'expérimentation a consisté à appliquer différents taux d'azote allant de 0 N à 150 N. Ces expérimentations étaient réparties sur un site en Ontario (Ottawa) et deux sites au Québec (Saint-Bruno-de-Montarville et Saint-Jean-sur-Richelieu).

Stics est un modèle qui simule la croissance des cultures comme une fonction du rayonnement solaire intercepté par le couvert ainsi que des stress hydrique et azoté. DNDC est un modèle initialement développé pour simuler les réservoirs de carbone du sol et les processus de dénitrification. Le modèle décrit le transport et la transformation de carbone et d'azote en fonction de la température, de l'humidité, du potentiel redox, du pH et des gradients de concentration du substrat. Daycent est un modèle biogéochimique utilisé pour estimer les changements dans la matière organique du sol, simuler les émissions de gaz, la biomasse végétale et la dynamique des nutriments en réponse aux variations climatiques et à l'apport d'azote. Il est dérivé de Century (Parton *et al.*, 1992). Les critères statistiques décrivant la performance sont l'erreur moyenne (ME) et l'erreur de prédiction (RMSE) exprimées en %.

Tableau 1 - Approches de modélisation et principaux processus déterminant la croissance des cultures et l'absorption d'azote pour les 3 modèles

	Stics	DNDC	Daycent
Accumulation de biomasse^a	RUE f(ps)	Emp – Dyn C/N	Emp
Formation du rendement^b	Y(HI _f ,B)	Y(HI _v ,B)	Y(HI _v ,B)
Phénologie de la culture^c	f(T, DL, V)	f(T, O, DL, V)	f(T, O, V, DL, S)
Stress^d	W, N, T	W, N, T	W, N, T
Dynamique de l'eau^e	C	C	f(C, R)
Evapotranspiration^f	SW	T	PM
C et N dans le sol^g	N, P(3),B	N(8), P(8), B	N(6), P(6), B
Nutrition azotée^h	DC	CNB	CNP

^a RUE f(ps) = efficacité d'utilisation du rayonnement par stades phénologiques ; Emp = accumulation biomasse empirique ; Dyn C/N : ratio C/N dynamique

^b HI_f = indice de récolte fixe ; HI_v = indice de récolte variant avec le remplissage du grain ; B = biomasse aérienne totale

^c T = température ; DL = photopériode (durée du jour) ; V = vernalisation ; O = autres stress en eau et en nutriments ; S = sénescence

^d W = stress hydrique ; N = stress azoté ; T = température

^e C = approche capacitive ; R = équation de Richards

^f SW = Shuttleworth et Wallace (modèle résistif) ; T = Thornthwaite ; PM = Penman-Monteith

^g N, N(x) = nombre de réservoirs azotés ; P(x) = nombre de réservoirs de matière organique ; B = réservoir de biomasse microbienne

^h DC = courbes de dilution azote critique et maximale ; CNB = limites supérieure et inférieure pour teneurs optimale et déficiente C/N de la plante ; CNP = ratio C/N de la plante calculé en fonction de la biomasse

Résultats et discussion

Les prédictions de biomasse sont bonnes pour Stics et DNDC et un peu moins bonnes pour Daycent (tableau 2), sauf en absence d'azote ou en faible apport (≤ 30 N), où les prévisions de Stics et Daycent sont moins robustes (ME > 10 %). Stics et DNDC n'ont pas montré de biais important en fonction de la quantité de précipitations en début de saison, tandis que l'erreur a augmenté pour Daycent quand l'eau est en excès. DNDC avec un formalisme de production de biomasse considérant des rapports C/N dynamiques a donc été légèrement plus performant.

Les bilans d'eau montrent que Stics simule une transpiration inférieure à celle simulée par les deux autres modèles. La littérature a montré que la méthode Thornwaite (DNDC), basée sur la température sans prise en compte explicite de l'approvisionnement en eau, était moins efficace que les modèles de combinaison (bilans d'énergie et radiatif) comme Penman-Monteith (Daycent) ou Shuttleworth et Wallace (Stics). Par ailleurs, le modèle de Penman-Monteith est un modèle à une seule couche (appelé "grande feuille") conçu pour être utilisé avec les cultures denses tandis que le modèle de Shuttleworth et Wallace considère une approche en deux couches (sol-végétation) pour une utilisation avec des cultures à plus faible densité, comme c'est le cas au Canada.

Les prédictions d'azote dans les plantes avec Stics sont moyennes pour les faibles taux d'azote appliqués (RMSE > 20 %), à bonnes pour les applications plus importantes d'azote (RMSE < 20 %). Ces prédictions sont légèrement meilleures dans l'ensemble avec Stics, qui utilise le concept de courbe de dilution. Ce concept a en effet été appliqué avec succès dans d'autres modèles de culture (Ceres, Daisy, Cropsyst). Daycent et DNDC, avec des formalismes liés au rapport carbone/azote, ont montré un biais important lorsque la pluie est en excès au début de la saison. Lorsque la pluie est proche de la normale au cours des deux premiers mois, les trois modèles prédisent bien l'azote dans la plante. Enfin, la réponse de la production à l'offre en azote simulée par Stics est influencée par la quantité d'eau disponible pour la culture (déficit hydrique) en début de saison, alors que ce n'est manifestement pas le cas pour Daycent et DNDC.

Tableau 2 - Evaluation statistique des simulations de la biomasse et de l'azote dans les plantes des modèles Stics, DNDC et Daycent

	ME (%)			RMSE (%)		
	Stics	DNDC	Daycent	Stics	DNDC	Daycent
Par quantité d'eau en début de saison						
<u>Déficit d'eau</u>						
Biomasse	4,8	6,7	4,0	21,4	24,7	33,2
N dans la plante	-20,6	-7,7	-20,4	29,4	26,4	36,1
<u>Excès d'eau</u>						
Biomasse	-7,7	9,2	39,9	19,2	24,3	33,2
N dans la plante	14,5	33,2	42,0	30,2	42,3	49,3
<u>Proche de la normale</u>						
Biomasse	9,9	-7,5	4,3	24,8	24,2	36,7
N dans la plante	3,4	-4,4	-0,2	18,4	20,7	28,3
Par dose d'application d'azote						
Biomasse 0N	14,9	1,1	17,3	34,7	34,7	39,5
Biomasse 30N	12,2	2,9	13,1	28,2	28,2	34,4
Biomasse 60N	5,6	0,6	4,3	19,6	21,8	35,6
Biomasse 90N	3,9	2,4	3,5	24,1	23,5	35,0
Biomasse 120N	-0,5	-5,7	9,8	16,0	21,7	30,5
Biomasse 150N	6,2	-1,8	12,4	15,1	18,0	26,8
N dans la plante 0N	1,2	-2,9	6,1	23,8	26,0	29,8
N dans la plante 30N	-3,5	-3,6	-2,2	33,2	19,9	25,1
N dans la plante 60N	-1,6	-2,9	-6,2	18,8	19,1	27,2
N dans la plante 90N	-4,9	-5,5	-9,5	14,4	16,4	23,7
N dans la plante 120N	0,9	-4,2	-2,7	19,7	24,9	33,1
N dans la plante 150N	-0,4	-6,0	-11,6	16,3	18,7	28,4

Conclusion

Les trois modèles ont simulé correctement la biomasse et l'azote dans la plante pour des niveaux d'azote proches des recommandations et des niveaux de pluies proches de la normale. Pour tous les niveaux d'azote et de pluie, DNDC avec un formalisme de production de biomasse considérant des rapports C/N dynamiques, semble être plus performant pour simuler la biomasse alors que Stics semble être plus robuste concernant l'azote dans la plante en utilisant le concept de courbe de dilution.

Références bibliographiques

Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussiere F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003 - An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.

- Desjardins R.L., Pattey E., Smith W.N., Worth D., Grant B., Srinivasan R., MacPherson J.I., Mauder M., 2010 - Multiscale estimates of N₂O emissions from agricultural lands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 817-824
- Foereid B., Bellamy P.H., Holden A., Kirk G.J.D., 2012 - On the initialization of soil carbon models and its effects on model predictions for England and Wales. *European Journal of Soil Science*, 63(1), 32-41.
- Jégo G., Pattey E., Bourgeois G., Morrison M.J., Drury C.F., Tremblay N., Tremblay G., 2010 - Calibration and performance evaluation of soybean and spring wheat cultivars using the STICS crop model in Eastern Canada. *Field Crops Research*, 117, 183-196.
- Li C., Frolking S., Frolking T.A., 1992 - A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 97, 9759-9776.
- Parton W.J., McKeown B., Kirchner V., Ojima D.S., 1992 - CENTURY Users Manual. Colorado State University, NREL Publication, Fort Collins, Colorado, USA.
- Parton W.J., Hartman M., Ojima D., Schimel D., 1998 - DAYCENT and its land surface submodel: Description and testing. *Global and Planetary Change*, 19, 35-48.

SESSION 2

Nouveaux formalismes intégrés à la version ModuloStics et nouveaux développements en cours

Animateur : E. Justes

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX CARBONE ET AZOTE DES SYSTEMES DE CULTURES : NOUVEAUX DEVELOPPEMENTS DANS MODULOSTICS

Bruno Mary¹, Elsa Coucheney¹, Joël Léonard¹, Marie Launay²

¹ INRA, US 1158 Agro-Impact, F-02000 Barenton-Bugny, France

² INRA, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

Mots-clés :

ModuloStics, impacts environnementaux, minéralisation, N₂O

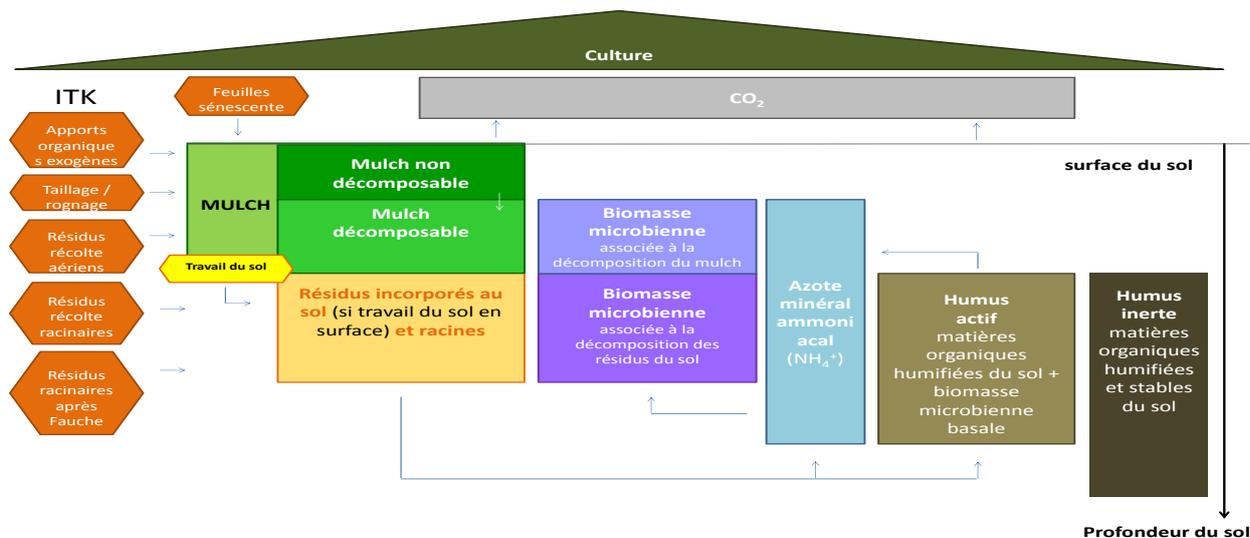
Introduction

Concilier production agricole et protection de l'environnement est un enjeu majeur. Dans ce contexte, développer la capacité du modèle Stics à simuler les impacts des cultures sur la qualité de l'eau, de l'air et du sol en relation avec les cycles du carbone et de l'azote et en fonction des pratiques agricoles est crucial. Nos récents développements dans Stics ont pour but d'améliorer la description des apports de matières organiques au sol et des processus biogéochimiques qui en découlent (minéralisation, nitrification et dénitrification) dans le but de mieux prédire le lessivage du nitrate, les émissions de gaz à effet de serre (N₂O) et le stockage de carbone dans les sols.

1. Bilan de matières organiques au sol et gestion du mulch végétal

Une bonne prise en compte des apports organiques au sol est essentielle pour modéliser la dynamique de l'azote minéral dans le sol à l'échelle de la culture et l'évolution des stocks de carbone du sol sur le long terme. Nous avons inclus une description plus fine des différents apports organiques au sol (nature, localisation) et de leur transformation, ainsi qu'un bilan complet du carbone et de l'azote organiques qui ont été évalués sur une large gamme de situations agronomiques (base SMS élargie). Les différents compartiments organiques sont résumés dans la figure 1. Les apports de matières organiques au sol se font soit en surface du sol (matières organiques exogènes, résidus de taille, feuilles tombées en cours de culture, résidus de culture à la récolte), soit sur la profondeur du profil pour les résidus racinaires arrivant au sol après récolte d'une culture ou la fauche d'une prairie. Les résidus apportés à la surface du sol forment un mulch qui persiste tant qu'il n'y a pas de travail du sol. Le mulch végétal comporte une fraction décomposable située au contact du sol, et une fraction non décomposable lorsque la quantité totale de mulch dépasse un seuil. Le mulch non décomposable est transféré vers le mulch décomposable au fur et à mesure que celui-ci disparaît. Dans les versions précédentes, les fonctions physique (effet sur le bilan hydrique et thermique) et biologique (vitesse de dégradation) du mulch étaient optionnelles et dissociées alors qu'elles sont maintenant couplées dans la version ModuloStics.

Figure 1 - Les différents compartiments organiques du sol



2. Disponibilité en azote minéral et décomposition des résidus apportés au sol

Prédire correctement la dynamique du pool de NH_4^+ est essentiel pour la modélisation des processus biogéochimiques contrôlant les émissions de N_2O et la lixiviation de nitrate (nitrification et dénitrification). La décomposition par la biomasse microbienne des résidus organiques apportés au sol contrôle l'évolution de ce pool de NH_4^+ à travers (1) la minéralisation de l'azote organique et (2) la remobilisation de l'azote minéral par la biomasse microbienne lorsqu'elle est limitée en azote. Les modifications apportées au module de minéralisation de Stics traduisent deux effets importants de l'azote minéral sur la décomposition des résidus (Giacomini *et al.*, 2007):

a. La disponibilité de l'azote minéral limite la décomposition

Si l'azote minéral est insuffisant pour dégrader les résidus en conditions optimales, plusieurs effets s'accroissent en fonction de l'importance de l'effet limitant : la décomposition est réduite, le C/N de la biomasse microbienne augmente, le C/N des composés humifiés augmente et un « *priming effect* » a lieu.

b. L'azote minéral accessible aux microorganismes pour la décomposition des résidus est une fraction de l'azote minéral du sol car les résidus sont spatialement localisés (ex : bandes de labour).

Cette modification est une option (activable ou non) dans laquelle la proportion de l'azote minéral qui est accessible aux décomposeurs dépend de la quantité de résidus. Cette option permet de garder la répartition verticale des résidus (entre 0 et *proftrav*) et de ne pas utiliser la cote *profres*.

Des exemples de l'effet de ces modifications/options seront donnés dans la présentation orale.

3. La dénitrification et les émissions de N_2O

Les émissions de N_2O pèsent lourd dans le bilan environnemental des cultures. Les modifications que nous proposons concernent i) la description de la dynamique de la teneur en eau en surface qui conditionne fortement la dénitrification ; ii) les processus de nitrification et dénitrification eux-mêmes, et en particulier la fraction molaire de N_2O produite par chacun de ces processus, qui est susceptible de varier en fonction des conditions d'aération par exemple.

a. Simulation de la teneur en eau en surface

La manière dont sont décrits les transferts d'eau dans Stics (hors option « macroporosité ») implique que la teneur en eau ne dépasse pas la capacité au champ (H_{cc}). Cette H_{cc} correspond sensiblement au taux de saturation, seuil au-delà duquel la dénitrification devient active. C'est une limite très importante pour la simulation des émissions de N_2O par dénitrification. Nous proposons une

alternative à l'utilisation de l'option « macroporosité », sans remettre en cause la description des transferts d'eau dans Stics (qui reste inchangée à l'échelle journalière) en incorporant un sous-module de gestion fine du drainage des couches de surface saturées après une pluie à l'échelle infra-journalière.

b. Nitrification et dénitrification

Nous nous sommes appuyés sur les travaux de Bessou *et al.* (2010) pour modifier le module de dénitrification et le calcul de la fraction de N₂O produite par la nitrification et la dénitrification. Le N₂O produit par nitrification dépend fortement du taux de saturation en conditions très humides. La fraction molaire de N₂O et la production de N₂O par dénitrification varient avec le taux de saturation et la concentration en nitrate.

La confrontation de résultats de simulation avec des données expérimentales issues de Bessou *et al.* (2010) et du projet No-Gas permet de montrer des résultats très encourageants, à la fois sur la simulation des variables de contrôle des émissions (température, eau et azote minéral) et sur les émissions de N₂O elles-mêmes (ordres de grandeur et dynamique).

Références bibliographiques

- Giacomini S., Recous S., Mary B., Aita C. 2007 - Simulating the effects of N availability, straw particle size and location in soil on C and N mineralization. *Plant and Soil*, 301, 289-301.
- Bessou C., Mary B., Leonard J., Roussel M., Grehan E., Gabrielle B., 2010 - Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields. *European Journal of Soil Science*, 61, 348-363.

INTRODUCTION DE LA NOTION DE DYNAMIQUE DE TALLES POUR UN COUVERT DE GRAMINÉES PERENNES ET QUELQUES AUTRES MODIFICATIONS CONCERNANT LES PRAIRIES

Françoise Ruget¹, François Lelièvre^{2 1}, Florence Volaire², Nadine Brisson^{3 2}, Dominique Ripoché³, Marie Launay³, Sylvain Satger^{1,2}

¹ INRA, UMR 1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

² INRA, UMR 1230 SYSTEM, F-34060 Montpellier, France, actuellement USC 1338, CEFE F-34295 Montpellier, France

³ INRA, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

Mots clés :

Prairies, graminées pérennes, dynamique de talles, formalisme

La décision d'introduire des formalismes pour modifier la densité de talles est venue du constat du comportement des talles comme des individus presque indépendants, qui a pour conséquence une mortalité partielle des plantes en cas de sécheresse (Lelièvre *et al.*, 2009) ou après la phase reproductrice (cas non traité actuellement). L'échelle de la plante n'est donc pas appropriée pour représenter ces phénomènes. C'est pourquoi un module de dynamique de talles a été conçu et introduit dans Stics. Il a fait appel à diverses compétences, celles des écophysologistes des graminées qui décrivent les processus et fournissent les connaissances, et celles des modélisateurs et des informaticiens qui les transforment en informations cohérentes pour le modèle. Ce travail est donc le fruit de la collaboration étroite entre des agronomes et des modélisateurs.

Introduction d'une dynamique de talles

L'objectif de ce module est de simuler la mortalité des talles en cas de sécheresse forte (quand, combien ?) et la reprise du tallage après ces périodes de stress. La possibilité de reprise liée à l'utilisation de réserves et observée dans la réalité existe dans Stics et est active.

Le modèle qui fonctionnait jusqu'à présent avec une densité de plantes qui ne pouvait que diminuer en cas d'accident à la levée, peut maintenant avoir une densité de talles variable au cours du cycle, par mortalité au cours de la sécheresse ou pendant la phase reproductrice et reprise ensuite.

La description technique des modifications réalisées dans le modèle a été faite dans le travail coordonné par Launay (2012), dont la partie prairie a largement inspiré cette note. Le couvert est donc considéré comme un ensemble de talles, qui ne sont pas toutes dans les mêmes conditions : leur niveau de stress hydrique est distribué de façon à ne pas avoir une population totalement synchrone. L'intensité moyenne du stress hydrique qui déclencherait la mortalité de talles (cf. Volaire *et al.*, 2009) peut être définie soit par les rapports des évapotranspirations réelle et potentielle, soit par ceux des transpirations. La loi de distribution du niveau de stress hydrique choisie est une loi gamma, qui a la qualité de ne pas pouvoir avoir de valeurs négatives, comme l'intensité du stress hydrique, compris entre 0 et 1. Cette loi est définie par sa moyenne (le niveau de stress), sa variance et sa forme, définies à partir de 2 paramètres.

- mortalité

La mortalité de talles survient lorsqu'une fraction infime (définie par un paramètre) des besoins en

¹ décédé le 15 septembre 2012

² décédée le 18 octobre 2011

eau de la partie encore vivante de la plante, essentiellement quelques fragments de gaine et le bourgeon terminal de la talle (partie en développement nommé apex), ne peut plus être assurée. Une surface transpirante mais non photosynthétisante est définie pour assurer une transpiration lorsque le LAI (indice foliaire) a presque totalement disparu par effet de la sécheresse. Ces formalismes et leurs effets sont décrits par Ruget *et al.* (2009).

Ce qui peut être paramétré par l'utilisateur est la variable choisie pour calculer le critère (évapotranspiration ou transpiration), le seuil de mortalité, la nature (codée en dur) et la valeur du paramètre de distribution de la loi gamma, le seuil de LAI à partir duquel entrent en jeu les fonctions de dynamique de talles.

La mortalité de talles se traduit par une diminution de la biomasse aérienne (la masse des talles qui meurent). Elle entraîne une augmentation de la vitesse de sénescence racinaire et la minéralisation des talles mortes sur les cinq premiers centimètres du sol, minéralisation calculée en distinguant la biomasse structurale et les réserves.

- **reprise de tallage**

Après le retour des pluies, le LAI reprend sa croissance et lorsqu'il dépasse une valeur seuil (une fraction du rapport densité réelle-densité maximale), le tallage reprend. Le tallage maximum possible est réduit si la densité atteinte après sécheresse est plus faible qu'un seuil. La vitesse de tallage dépend de la densité présente et de la température (avec une loi d'action bilinéaire à 3 seuils : minimum, optimum, maximum).

Conséquences sur les autres parties de la plante : fonctions racinaires

- Ralentissement de la sénescence racinaire en période de sécheresse
En cas de sécheresse, la croissance en profondeur et en densité des racines est ralentie, jusqu'à s'annuler à un seuil qui est, par défaut, le point de flétrissement (et peut-être paramétré). En cas de température élevée, l'effet négatif de températures supérieures à l'optimum (où sont atteintes les vitesses maximales de croissance en profondeur et en densité) peut être activé pour la croissance des racines. Ce seuil provoque un ralentissement de l'installation de nouvelles racines en température élevée et retarde par conséquent le début de la sénescence racinaire, en réduisant les températures cumulées. Ces formalismes sont indépendants de la dynamique de talles.
- Arrêt de la croissance racinaire le jour de la fauche, et lorsque la croissance aérienne est nulle.
- Ajout d'un rapport tige/feuille spécifique le jour de la fauche
Le jour de la fauche, le rapport tige/feuille (en fait gaines/limbes) n'a plus la valeur unique définie par ailleurs (fichier plante), mais une valeur spécifique qui prend en compte la composition particulière de la plante après fauche (beaucoup de gaines, peu de limbes).
- Mise en place d'un déplafonnement des réserves pour le cycle reproducteur
A partir de la montaison, où peut se produire une mise en réserves importante, la mise en réserves n'est plus limitée (désactivation du paramètre de plafonnement).
La date de montaison est donc calculée à partir de l'entrée en vernalisation, avec la somme stlevamf (en supposant que les stades vernalisation et levée se correspondent).

Ajout d'une ordonnée à l'origine pour la croissance du LAI

La dynamique du LAI est limitée par une sigmoïde dépendant du stade de développement (entre levée et date du maximum de LAI), le plateau de cette sigmoïde étant la vitesse maximale de croissance du LAI par degré-jour. Jusqu'à présent, cet accroissement quotidien initial était nul. Il est maintenant possible de lui donner une valeur non nulle, qui permet un démarrage moins lent du LAI en conditions favorables.

Références bibliographiques

- Launay M. (coord.), 2012. Nouveaux formalismes, nouveaux paramètres, nouvelle place des paramètres : passage de STICS v 6.9 à ModuloSTICS v1.1, document interne préparé par E. Justes, M. Launay, B. Mary, D. Ripoche, F. Ruget, INRA Agroclim Avignon.
- Lelièvre F. * and Volaire F., 2009. Current and Potential Development of Perennial Grasses in Rainfed Mediterranean Farming Systems *Crop Sci.* 49:2371–2378.
- Ruget F., Satger S., Volaire F., And Lelievre F., 2009. Modeling Tiller Density, Growth, And Yield Of Mediterranean Perennial Grasslands with STICS, Conference Information: 1st International Workshop on Summer Dormancy in Grasses - Coping with Increasing Aridity and Heat under Climate Change, Date: APR 06-08, 2009 Samuel Roberts Nobel Fdn Ardmores OK, *Crop Sci.* 49:2379-2385
- Voltaire F., Norton M. R., and Lelièvre F., 2009. Summer Drought Survival Strategies and Sustainability of Perennial Temperate Forage Grasses in Mediterranean Areas *Crop Sci.* 49:2386–2392.

DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE MALADIES FONGIQUES AERIENNES COUPLE AU MODELE DE CULTURE STICS

Julie Caubel¹, Marie Launay¹, Dominique Ripoché¹, Nadine Brisson¹

¹ INRA, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

Mots clés :

Changement climatique, maladies fongique aériennes, modélisation générique, processus épidémiologiques, rouille brune du blé, mildiou de la vigne

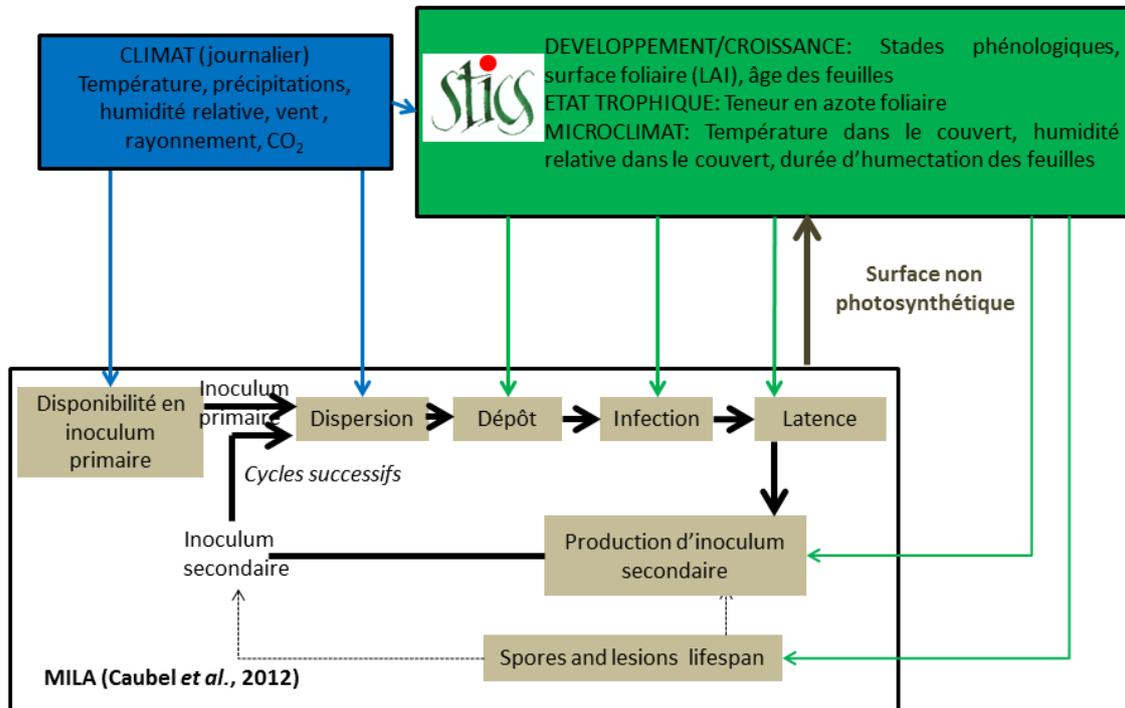
Introduction

Le changement climatique influence le développement et l'occurrence des maladies des plantes (Chakraborty et Newton, 2011). Pour adapter l'agriculture à ces nouvelles conditions, des outils de compréhension et de prévision du fonctionnement d'une large gamme de pathogènes sont nécessaires. Développer un modèle générique de développement des maladies fongiques aériennes, basé sur les processus et couplé à un modèle de culture, est un outil intéressant pour comprendre à la fois les effets directs du changement climatique mais aussi indirects (via la plante hôte) sur les étapes de développement des maladies. Dans cette étude, nous présentons le modèle développé, Mila (Modèle de dynamique des maLadie Aériennes), son couplage avec le modèle de fonctionnement des cultures Stics, ainsi que son adaptation à deux pathogènes très dommageables en milieu tempéré : la rouille brune du blé et le mildiou de la vigne.

Description du modèle Mila et de son couplage avec Stics

Le modèle de dynamique des maladies Mila est un modèle à structure modulaire simulant des cycles épidémiologiques successifs sur une plante moyenne à l'échelle de la parcelle avec un pas de temps journalier (figure 1). Il calcule la sévérité de maladie (%). Pour chaque processus épidémiologique simulé, deux ou trois fonctions de réponse (options de simulation) sont proposées, de façon à pouvoir s'adapter à des pathogènes variés. Les variables d'entrée du modèle sont relatives au microclimat (dans le couvert végétal), aux variables de développement et d'état trophique de la culture ou au climat (Caubel *et al.*, 2012). Les variables relatives à la plante sont fournies par le modèle de fonctionnement des cultures Stics couplé à pas de temps journalier (Brisson *et al.*, 2009). La rétroaction vers Stics est formalisée par la déduction de la surface non photosynthétique (surface couverte par des lésions) de la surface foliaire verte.

Figure 1 - Mila, ses modules et son couplage avec Stics (variables de couplage explicitées)



Adaptation de Mila à la rouille brune du blé et au mildiou de la vigne

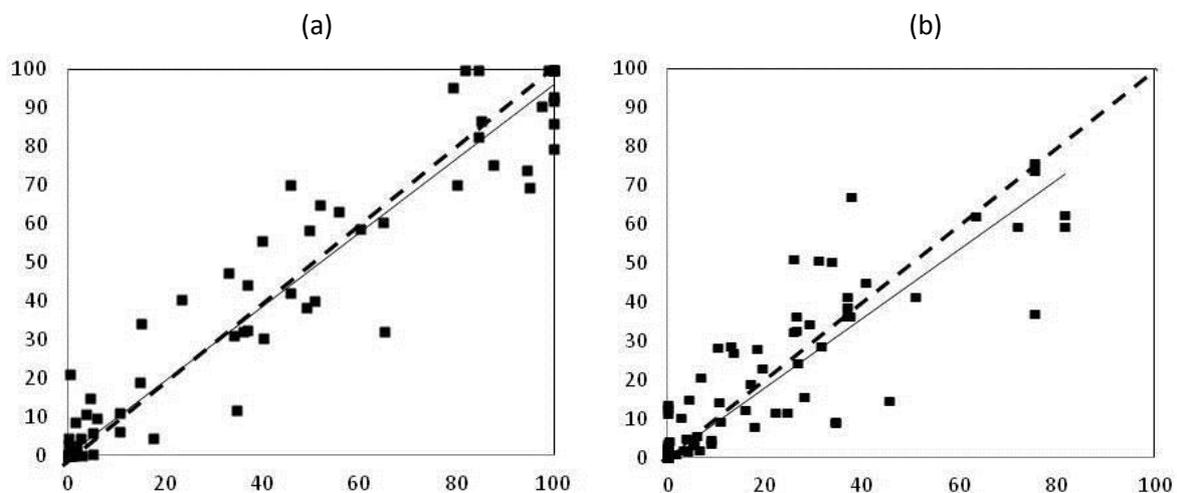
Mila a été adapté à 2 pathogènes : la rouille brune (*Puccinia triticina*) du blé tendre/dur (RB) et le mildiou (*Plasmopara viticola*) de la vigne (MV). Pour cela, nous avons sélectionné pour chaque pathogène et chaque processus simulé une fonction de réponse adaptée à leur simulation (Figure 2).

Figure 2 - Options de simulations choisies dans Mila pour chacun des deux pathogènes : rouille brune (*Puccinia triticina*) du blé tendre/dur (RB) et mildiou (*Plasmopara viticola*) de la vigne (MV)

Processus MILA		RB	MV	Option 3
		Option 1	Option 2	
Disponibilité en inoculum primaire		Directement infectieux	Pas directement infection (pluie et T)	
Dispersion		Toujours possible	Pluie	
Dépôt	Organe cible	Feuilles	Fruits	
	Age feuilles	Non	Jeunes feuilles sensibles	Feuilles âgées sensibles
Infection		T couvert	T couvert, SWD	
Latence		T couvert	T couvert, HR couvert	
Production en inoculum secondaire	Microclimat	T couvert	T couvert, Durée de HR diurne > seuil	T couvert, Durée de HR nocturne > seuil
	Age des lésions	Non	Oui	
	Teneur en azote foliaire	Non	Oui	
Durée de vie des lésions		Constante	T couvert	T couvert, HR couvert
Durée de vie des spores		Constante	T couvert / T air	T couvert / T air, HR couvert / HR air

Puis, un paramétrage initial des équations de Mila à partir de mesures expérimentales de la bibliographie a été réalisé. Pour calibrer Mila-RB et Mila-MV, nous avons soumis les paramètres de Mila à une analyse de sensibilité de façon à identifier les paramètres les plus influents des deux modèles. Ces paramètres ont été optimisés par ajustement des dynamiques de sévérité de maladie simulées à des dynamiques de maladies observées sur différents sites français et différentes années (valeurs de paramètres retenues telles que la RMSE soit minimale). L'erreur de prédiction (RMSEp), calculée par validation croisée (Wallach *et al.*, 2006), est de 9,97 % dans le cas de Mila-RB et de 10,66 % dans le cas de Mila-MV (figure 3).

Figure 3 - Sévérités de maladie simulées par Mila en fonction des sévérités de maladie observées (%) (par validation croisée) (a) RB (83 observations issues de 14 essais d'Arvalis, (b) MV (89 observations issues de 11 essais des Chambres d'Agriculture).



Conclusion

L'application de Mila à 2 pathogènes a révélé sa capacité à simuler de façon réaliste leurs dynamiques de maladie. Sa structure modulaire et générique permet de l'adapter potentiellement à d'autres pathogènes. De plus, son approche mécaniste en fait un bon outil de compréhension de l'évolution des pressions de maladie à partir de l'analyse des variables intermédiaires qu'il fournit.

Références bibliographiques

- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009 - Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Éditions Quae, 304 p.
- Caubel J., Launay M., Lannou C., Brisson N., 2012 - Generic response functions for simulating climate-based processes in crop pathosystem models. *Ecological Modelling*. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.05.012
- Chakraborty S., Newton A.C., 2011 - Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant Pathology*, 60, 2-14.
- Wallach D., Makowski D., Jones J., 2006 - Working with dynamic crop models: Evaluation, Analysis, Parameterization and Applications. Elsevier. 447 pp.

MODULOSTICS : UTILISATION SOUS L'INTERFACE HOMME-MACHINE JAVASTICS ET IMPLEMENTATION SOUS LA PLATE-FORME RECORD

Dominique Ripoche¹, Julien Cufi¹, Hélène Raynal², Patrick Chabrier², Eric Casellas²

¹ INRA, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

² INRA, UR 0875 BIA, F-31326 Castanet-Tolosan, France

Mots-clés :

ModuloStics, JavaStics, Record, modularisation, interface homme-machine, plate-forme de modélisation

Modularisation du code de Stics : ModuloSics

Le travail de modularisation de Stics a d ebut e il y a quelques années dans un souci de facilitation de son couplage avec d'autres modèles (Bernard et Ripoche, 2008). Il a été r ealis e en 2 phases (D. Ripoche *et al.*, 2010) et avec 2 objectifs principaux :

- Compréhension du code source :
 - Commentaires scientifiques et définition des paramètres et variables au sein de chaque sous-programme
 - Règle de nommage des paramètres
- Dialogue avec les autres modèles/plates-formes
 - Regroupement des paramètres et variables dans des structures (suppression des communs)
 - Red ecoupage du code avec Indépendance de la boucle journalière.

Ce travail s' est accompagn e de la mise en place d'un nouveau mode de fonctionnement avec le groupe des référents, comme la mise en place d'un gestionnaire partag e de versions ou la formation à la prise en main du code.

La nouvelle version ModuloStics v12 est disponible avec l'interface homme-machine (IHM) sur le site de Stics http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics.

Deux options seront possibles pour la licence du code de ModuloStics :

1. une licence AGPL (licence publique générale Affero) si utilisation dans un cadre scientifique,
2. un contrat particulier si usage commercial.

Il reste à mettre en place les outils permettant la mise à disposition du code pour les nouvelles versions du modèle avec l'accès aux informations nécessaires à la mise en  oeuvre de la licence et aux documents afférents à la gestion des droits.

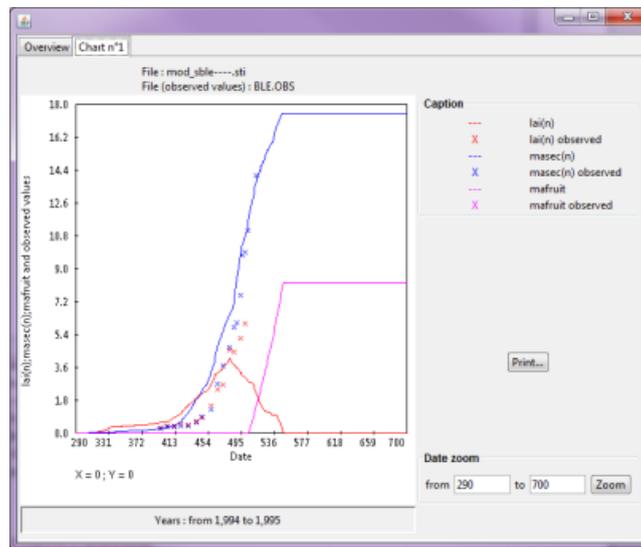
Développement d'une nouvelle interface JavaStics

Parall eliquement au développement de ModuloStics, une nouvelle version de l'IHM a été développée. Elle présente les fonctionnalités de l'ancienne interface avec des améliorations :

- Ergonomie :
 - réorganisation des répertoires
 - stockage des logs des actions au sein de l'IHM
 - mise au format des anciennes versions (5.x et 6.x)
- Gestion des entrées :
 - sécurité des fichiers XML
 - gestion transparente de l'ajout de paramètres
- Gestion des sorties :
 - visualisation des fenêtres graphiques

- choix des sorties

Figure 1 - exemple d'une fenêtre graphique de l'IHM JavaStics



Insertion de ModuloStics sous la plate-forme Record

Le nouveau code ModuloStics est disponible sous la forme de 2 paquets informatiques utilisables sur la plate-forme Record (Bergez *et al.*, 2012).

Le premier paquet intègre directement le code source des fonctions Stics appelées dans la boucle journalière de ModuloStics. La technique employée a consisté à encapsuler le code Fortran 90, dans des routines C++ de la plate-forme Record permettant, d'une part, de faire le lien entre les 2 langages, et d'autre part, d'être compatible avec les modalités de programmation avec VLE, logiciel utilisé par Record. Les entrées/sorties sont quant à elles gérées directement par la plate-forme. Le deuxième paquet contient des classes de modèles construits autour de ModuloStics, avec l'ajout de fonctionnalités supplémentaires comme le pilotage des pratiques culturales par un modèle de décision, le forçage de variables d'état ou la mise en œuvre des rotations.

Ces paquets sont générés grâce à une chaîne de production semi-automatique car nécessitant encore quelques interventions manuelles dans le code.

Le codage est en cours de normalisation pour permettre une automatisation complète de la procédure d'encapsulation.

La mise en œuvre de ces paquets ModuloStics assurée pour le moment par l'équipe Record devrait passer de manière opérationnelle à l'équipe Stics d'Avignon.

Une réflexion conjointe des 2 équipes sur la façon de gérer la chaîne de production depuis la diffusion du code de ModuloStics jusqu'à la mise à disposition des paquets sous Record est en cours (accès au code pour l'équipe Record, test en continu des versions intermédiaires du code, etc.)

Références bibliographiques

- Bergez J.-E., Chabrier P., Gary C., Jeuffroy M.H., Makowski D., Quesnel G., Ramat E., Raynal H., Rouse N., Wallach D., Debaeke P., Durand P., Duru M., Dury J., Faverdin P., Gascuel-Oudou C., Bernard P., Ripoche D., 2008 - Projet modularisation du modèle STICS : Partie I Cahier des Charges, Note technique AGROCLIM n°4, 38 p.
- Bernard P., Ripoche D., 2008 - Projet modularisation du modèle STICS : Partie I Cahier des Charges, Note technique AGROCLIM n°4, 38 p.
- Garcia F. 2012 -An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agroecosystems. *Environmental Modelling and Software (In Press, Corrected Proof, Available online 9 April 2012)*

Ripoche D., Bernard P., Chabrier P., 2010 - Modularisation de Stics : mise en œuvre et implémentation sur les plateformes (Record, Eau-dysée). Séminaire Stics Mars 2010 Soréze. Présentation orale

SESSION 3

**Applications de Stics aux problématiques
environnementales (nitrates, pesticides, gaz à effet de serre,
etc.)**

Animateur : N. Beaudoin

SIMULATION DE L'IMPACT DES CULTURES INTERMÉDIAIRES SUR LA LIXIVIATION DE NITRATE, LE DRAINAGE ET LE RENDEMENT DE LA CULTURE SUIVANTE DANS DIVERS PEDOCLIMATS FRANÇAIS

Julie Constantin, Eric Justes

INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

INP, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

ENSAT, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

Mots-clés

Cultures intermédiaires, azote, drainage, lixiviation, rendement

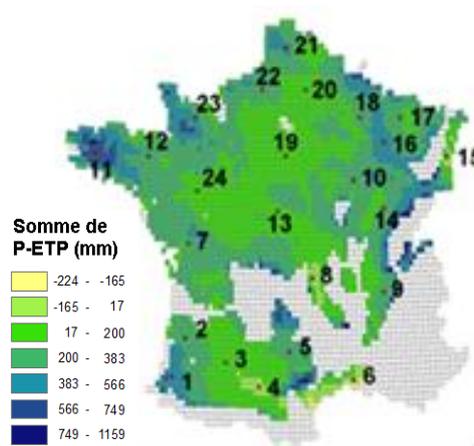
Introduction

La Directive européenne "Nitrate" a conduit le gouvernement français à imposer, à partir de 2012, l'implantation systématique de cultures intermédiaires, avant les cultures de printemps, dans les « zones vulnérables nitrate », afin de réduire les fuites d'azote nitrique d'origine agricole vers les aquifères. De nombreuses études ont démontré que ces cultures intermédiaires permettaient de réduire la concentration nitrique des eaux qui percolent pendant l'interculture, mais avec une large gamme d'efficacité, de 6 à 87 % selon le contexte pédoclimatique, l'espèce de culture intermédiaire et ses dates de semis et de destruction (Meisinger *et al.*, 1991). L'objectif de ce travail est de déterminer l'efficacité de trois espèces de cultures intermédiaires semées et détruites à différentes dates, pour réduire la lixiviation d'azote, dans divers pédoclimats français. Un second objectif est d'analyser l'effet de ces cultures intermédiaires sur le drainage et le rendement de la culture suivante.

Matériels et Méthodes

Dans les régions agricoles concernées par les « zones vulnérables nitrate », 24 sites ont été sélectionnés selon leur déficit climatique (Pluie - ETP) d'août à mars. Pour chaque site climatique, 2 à 4 sols représentatifs en termes de réserve utile en eau, de profondeur et de texture de surface ont été choisis à partir de la base de données des sols de France à 1/1 000 000 (INRA, 1998). L'étude est réalisée à l'échelle de la parcelle à l'aide du modèle Stics (Brisson *et al.*, 2008) dans sa version 6.9 modifiée (6.97). Les simulations sont conduites sur 20 années climatiques, de 1988 à 2008 (données Météo-France SAFRAN), la période simulée allant de la récolte du précédent blé jusqu'au début de la période de drainage de l'année suivante, avec une longue interculture suivie d'un maïs. Ces simulations sont initialisées avec 3 quantités d'azote minéral du sol (1 = 20, 2 = 60, 3 = 100 kg Nha⁻¹ sur 90 cm). En interculture, la situation de référence est le sol nu avec résidus enfouis. Dans les autres cas, 3 espèces de cultures intermédiaires sont simulées (moutarde blanche, ray-grass italien (RGI), vesce) avec différentes dates de levée et de destruction. Dans ce résumé sont présentés 3 dates de levée (25/7, 25/8 et 25/9) et 2 dates de destruction (10/11 et 10/3). L'impact des cultures intermédiaires est calculé en différence par rapport à la situation de référence (ΔNO_3 , $\Delta\text{drainage}$, $\Delta\text{rendement}$).

Figure 1 - Carte de P-ETP d'août à mars et sites climatiques sélectionnés



Résultats

a) Drainage et lixiviation de la situation de référence en sol nu

Le drainage dans la situation de référence varie fortement, de 0 à 1370 mm/an selon le site, le type de sol et l'année climatique. Pour le site le plus aride (573 mm/an), le drainage médian annuel est de 170 mm tandis que les sites les plus pluvieux (>1000 mm) drainent, en médiane, plus de 500 mm/an. La lixiviation de nitrate associée varie de 0 à 250 kg N.ha⁻¹.an⁻¹. Elle est d'autant plus importante que le site est pluvieux, la réserve utile du sol faible et la quantité d'azote minéral du sol à la récolte du blé élevée. Les concentrations nitriques des eaux de drainage varient, en moyenne, de 30 à 158 mgNO₃.L⁻¹, selon le site et la quantité d'azote minéral initial.

b) Effet de l'espèce de culture intermédiaire et de la quantité d'azote minéral initial du sol

La quantité d'azote absorbée, en moyenne, est quasiment identique pour la moutarde et le RGI, et est d'autant plus forte que la quantité d'azote initiale est élevée (tableau 1). Cela se traduit par une réduction de la concentration nitrique des eaux de drainage par rapport au sol nu de référence (ΔNO_3), de 42 à 57 %, légèrement plus forte sous moutarde que sous RGI. Au contraire, la réduction de drainage (Δ drainage) est en moyenne plus forte pour le RGI, car celui-ci est parfois détruit en mars tandis que la moutarde est systématiquement détruite en novembre. De plus, pour une même date de destruction, la graminée consomme plus d'eau. La vesce acquiert (fixation incluse) environ 60 kgN.ha⁻¹, quel que soit le niveau d'azote initial, mais entraîne une réduction de la concentration nitrique de seulement 26 %, soit environ moitié moins que la moutarde et le RGI. La réduction de drainage est cependant équivalente à celle du RGI. L'impact sur le rendement du maïs (Δ rendement) est faible mais positif en moyenne, avec un impact plus fort de la vesce, puis de la moutarde et enfin du RGI.

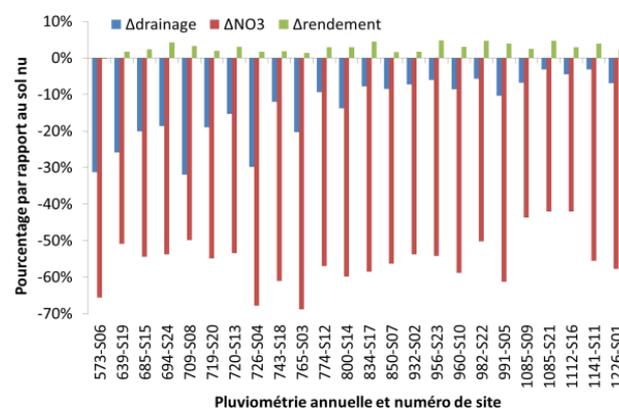
Tableau 1 - Azote acquis et différence de concentration nitrique, drainage et rendement par rapport au sol nu par espèce et azote initial.

Espèce	N initial	N absorbé + fixé (kg/ha)	ΔNO_3	Δ drainage	Δ rendement
Moutarde	1	42	-57%	-8%	2%
	2	57	-47%	-8%	2%
	3	73	-44%	-8%	3%
Ray-grass	1	44	-57%	-11%	1%
	2	57	-46%	-11%	2%
	3	70	-42%	-11%	3%
Vesce	1	63	-32%	-10%	3%
	2	59	-25%	-10%	3%
	3	58	-22%	-10%	2%

c) Effet du site dans le cas d'un ray-grass levé au 25/8 avec 60 kg N.ha⁻¹ d'azote minéral initial

L'efficacité de la culture intermédiaire pour réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage varie selon le site entre 42 % et 69 % de réduction, en moyenne, sur 20 ans (figure 2). Le taux de réduction a tendance à être moins élevé pour les sites plus pluvieux mais la variabilité intersite s'explique également par les quantités d'azote piégées par la culture intermédiaire, plus importantes dans les sites situés au sud. La réduction de drainage, entraînée par l'évapotranspiration accrue de la culture intermédiaire, est d'environ 30 mm en moyenne, mais représente de 3 à 32 % du drainage total sous sol nu selon le site. Ce pourcentage est donc d'autant plus élevé que le site est peu pluvieux. L'impact de la culture intermédiaire sur le rendement du maïs suivant est généralement positif, excepté sur le site méditerranéen (6), pour lequel des effets de préemption d'azote sont simulés. En effet, ce phénomène est plus fréquent pour des sites secs d'où un effet positif plus important sur le rendement du maïs quand la pluviométrie annuelle s'accroît.

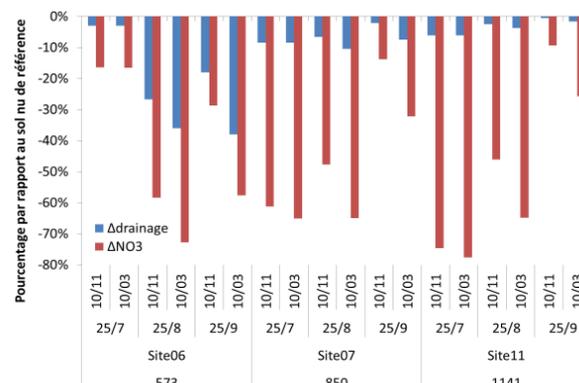
Figure 2 - Réduction de la concentration nitrique, du drainage et du rendement de la culture suivante avec RGI par site



d) Effet des dates de levée et de destruction du ray-grass pour 3 sites contrastés

Le taux de réduction de la concentration nitrique dépend fortement de la date de levée de la culture intermédiaire en interaction avec le site climatique (figure 3). Ainsi, sur le site peu pluvieux (6), la date de levée la plus adaptée parmi les trois simulées est celle du 25/8 alors qu'il s'agira du 25/7 pour le site 11. La date de destruction tardive est moins cruciale, sauf dans le cas d'une levée tardive au 25/9. Cette destruction tardive permet néanmoins d'augmenter l'efficacité de la culture intermédiaire mais a un effet plus négatif sur le drainage. Excepté dans le sud, la date du 25/9 ne permet pas d'atteindre un bon niveau de réduction de la concentration nitrique, mais reste cependant préférable à un sol nu en interculture.

Figure 3 - Réduction de la concentration nitrique et du drainage par dates de levée et de destruction du ray-grass.



Conclusion

Les cultures intermédiaires, en particulier non légumineuses, permettent de réduire la concentration nitrique de l'eau de drainage de plus de 40 % en moyenne sur 20 ans. Cette réduction des fuites de nitrate s'accompagne d'une réduction du drainage qui peut représenter près de 30 % du drainage annuel pour des sites peu pluvieux, ce qui est important. Les cultures intermédiaires n'ont pas d'impact négatif en moyenne sur le rendement de la culture suivante, sauf en site sec. Dans ce cas, ces effets peuvent être évités en adaptant la date de destruction (plus précoce) ou en semant des cultures intermédiaires en mélange avec une légumineuse. Enfin, les dates de semis et de destruction de la culture intermédiaire, ainsi que l'espèce doivent être adaptées en fonction du site climatique et des enjeux prioritaires visés (fuites de nitrate, ressources en eau, rendement des cultures).

Références bibliographiques

- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008 - Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model, Editions Quae, 301 p.
- INRA, 1998 - Base de données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1/1 000 000, version 1 du 21/12/1998. Infosol
- Meisinger J.J., Hargrove W.L., Mikkelsen R.L., Williams J.R., Benson V.W., 1991 - Effects of cover crops on groundwater quality, in: W.L. Hargrove (ed.), *Cover crops for clean water*, Soil and Water Conservation Society, Etas-Unis. p.57–68.

COUPLAGE D'UNE BASE DE DONNEES A LONG TERME AVEC LES MODELES SWAT ET STICS EN VUE DE LES TESTER ET DE SIMULER DES SCENARIOS DE GESTION DE L'AZOTE

*Mathieu Deneufbourg*¹, *Nicolas Pugeaux*², *Jean Huguet*², *Claire Billy*², *Jérôme Duval*²,
*Christophe Vandenberghe*¹, *Jean-Marie Marcoen*¹, *Nicolas Beaudoin*²

¹ Université Liège-Gembloux, Agro-Bio Tech., Unité Systèmes Sol-Eau, Passage des Déportés 2, B-5030 Gembloux, Belgique

² INRA, US 1158 Agro-Impact, F-02000 Barenton-Bugny, France

Mots-clés

Bassin versant, test croisé, Stics, Swat, nitrate, azote

Contexte et objectifs

À l'échelle européenne, la pollution des eaux superficielles et souterraines par le nitrate d'origine agricole (UE, 2010) combinée à la pénurie mondiale de matières premières rend indispensable une meilleure utilisation de l'azote. La modélisation permet de prédire à long terme la production agricole et la lixiviation du nitrate sous la zone racinaire jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Le projet européen Sun, « Sustainable Use of Nitrogen », vise à contribuer à une gestion plus durable de l'azote en agriculture afin de réduire les pertes vers l'eau et l'air.

Un objectif du projet est de quantifier, dans deux bassins versants, l'impact sur la lixiviation du nitrate de différents scénarios tactiques ou stratégiques de gestion de l'azote et de pratiques agricoles par une modélisation sur 50 ans du système sol-culture-air conjointement avec les modèles Stics et Swat. Ce document est axé sur la méthode et les résultats du couplage base de données-modèles.

Matériels et méthodes

Zones d'étude

L'étude a été menée sur deux bassins versants (tableau 1) suivis depuis 1990 à Bruyères (France) et 2000 à Arquennes (Belgique).

Tableau 1 - Descriptif des bassins versants étudiés.

Nom	Localisation	Superficie	Hétérogénéité des sols	Système de culture	Référence
Arquennes	Wallonie (Belgique)	78 ha	Faible (limons, limons sableux)	Polyculture-élevage	Deneufbourg <i>et al.</i> , 2010
Bruyères	Aisne (France)	160 ha	Élevée (limons argilo sableux, sables, argiles...)	Grandes cultures	Beaudoin <i>et al.</i> , 2005

Modèles

Deux modèles de culture ont été utilisés : un modèle orienté plus spécifiquement agronomie, Stics (Brisson *et al.*, 2003), précédemment spatialisé (Schnebelen *et al.*, 2004), et un modèle orienté plus spécifiquement hydrologie, Swat (Neitsch *et al.*, 2005). Le modèle Stics fonctionne à l'échelle de point de mesure alors que le modèle Swat fonctionne à l'échelle de HRU (Hydrological Response Unit) agrégées et en interactions à l'échelle du bassin versant. Les entrées des modèles sont le climat, l'occupation du sol, les caractéristiques édaphiques, la topographie (uniquement pour Swat) et les pratiques agricoles. Les sorties des modèles sont le rendement des cultures, leur biomasse, les

bilans d'eau (ruissellement uniquement pour Swat) et d'azote. Pour Stics, le stock d'azote minéral du sol est une sortie supplémentaire étudiée. Le bassin versant d'Arquennes avait déjà été modélisé avec le modèle Swat dans une étude précédente, alors que le bassin versant de Bruyères avait déjà été modélisé avec le modèle Stics. La présente étude consiste donc à croiser et comparer les modèles sur les deux bassins versants.

Base de données

Les données de terrain mesurées sur les deux bassins versants, initialement stockées dans des feuilles de calcul, ont été triées, standardisées et insérées dans une base de données gérée sous PostgreSQL (Duval *et al.*, 2010).

Couplage base de données-modèles

Une interface a été développée pour créer automatiquement les fichiers d'entrée du modèle Stics en recherchant les données nécessaires dans la base de données et en adaptant leur format (projet Espia). Le fichier d'entrée de Swat relatif aux pratiques culturales est également généré automatiquement à travers l'interface.

Résultats et discussion

Les premiers résultats, concernant la betterave à sucre et la pomme de terre (rendement et teneur en azote du sol), obtenus sur plusieurs parcelles (de 1 à 10 ha) représentatives du bassin versant d'Arquennes de 2000 à 2007 ont montré des différences entre Stics et Swat (tableau 2). En effet, la prédiction du rendement en sucre de la betterave est meilleure avec Stics comparé à Swat pour ces parcelles. Par contre, la prédiction en pomme de terre par Stics est perfectible (RMSE élevée). Certains paramètres liés à cette culture devront être ajustés.

Les prédictions par Stics du contenu en azote minéral du sol pour ces 2 cultures sont satisfaisantes. Cette variable n'est pas disponible en sortie de Swat (version 2005).

Tableau 2 - Rendement moyen annuel et contenu moyen du sol en azote minéral observés et simulés avec Stics et Swat.

	Rendement moyen ($t\ ha^{-1}$)					Contenu moyen du sol en azote minéral ($kg\ N\ ha^{-1}$)				
	Stics	Swat	Observé	RMSE ($t\ ha^{-1}$)		Stics	Swat	Observé	RMSE ($kg\ N\ ha^{-1}$)	
				Stics	Swat				Stics	Swat
Betterave	70,6	69,2	73,6	11,0	18,8	42,3	/	45,5	9,1	/
Pomme de terre	66,1	49,4	56,1	21,2	12,2	65,5	/	59,3	15,9	/

À Bruyères, les simulations faites de 1990 à 2011 sur l'ensemble du bassin versant ont montré une sous-estimation par Swat des rendements en céréales notamment en blé tendre (tableau 3) et une surestimation des rendements par Stics pour ces mêmes cultures. Ces résultats montrent la nécessité d'ajuster certains paramètres des modèles pour une meilleure adaptation au contexte local.

Tableau 3 - Rendements moyens en blé tendre et escourgeon observés et simulés avec Stics et Swat

	Rendement moyen ($t\ ha^{-1}$)				
	Stics	Swat	Observé	RMSE ($t\ ha^{-1}$)	
				Stics	Swat
Blé tendre	7,57	3,76	7,23	4,03	4,17
Escourgeon	8,91	5,73	6,68	3,52	2,32

Conclusion

Les résultats préliminaires ont permis de révéler certaines différences entre les modèles Stics et Swat, et de tester le couplage entre base de données et modèles. Ce couplage facilite l'utilisation et la comparaison de plusieurs modèles et améliore la fiabilité de prédiction à long terme.

Remerciements

Nous remercions le FEDER (UE), la région Picardie (ESPIA) et le Service Public de Wallonie.

Références bibliographiques

- Beaudoin N., Saad J., Van Laethem C., Maucorps J., Machet J.M., Mary B., 2005 - Nitrate leaching in intensive arable agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 111, 292-310.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche Y.-M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.-P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003 - An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Marcoen J.M., 2010 - Mise en œuvre du Programme de Gestion Durable de l'Azote et évaluation d'impact à l'échelle d'un bassin versant agricole (Arquennes, Belgique). *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 14 (S1), 27-38.
- Duval J., Constantin J., Beaudoin N., 2010 - Interfaçage d'une base de données POSTGRESQL d'essais de longue durée avec le modèle STICS. Poster- *Séminaire STICS* ; 16-18 mars 2010, Sorèze, France.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2005 - Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005. Temple, Texas: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Schnebelen N., Nicoulaud B., Bourennane H., Couturier A., Verbeque B., Revalier C., Bruand A., Ledoux E. 2004 - The STICS model to predict nitrate leaching following agricultural practices. *Agronomie*, 24, 423-435.
- UE, 2010 : Mise en œuvre de la directive 91/676/CEE du Conseil concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. Synthèse des rapports établis par les États membres pour la période 2004-2007. Commission Européenne. 13 pages.

INTEGRATION DU TRANSFERT DES PESTICIDES DANS STICS : COMPARAISON DE RESULTATS OBTENUS SUR DIFFERENTS SITES

Hélène Blanchoud¹, Wilfried Queyrel¹, Frederik Van Den Berg², Florence Habets¹

¹ UPMC-EPHE-CNRS, UMR 7619 Sisyphé, F-75252 Paris, France

² Alterra, Univ. Wageningen, Centre for water and climate, P.O. Box 47, 6700 AK Wageningen, The Netherlands

Mots clés :

Atrazine, Pesticides, sorption, dégradation

Cette étude propose une approche simplifiée du transfert de pesticides à l'échelle du bassin versant basée sur des pratiques agricoles réelles. Elle est fondée sur un couplage dynamique entre le modèle de culture Stics et des modèles de transferts hydrologiques et hydrogéologiques. Il existe déjà des modèles de transfert des pesticides qui sont généralement développés pour simuler le transfert vers la zone sous-racinaire (Macro), vers la rivière (PRZM) ou l'atmosphère (Volt'air). Pourtant, dans chacun de ces modèles, la prise en compte des interactions spécifiques des pesticides est basée sur le même principe de calcul. La comparaison de modèles montre que, généralement, ces modèles mettent l'accent sur la façon de considérer le transfert de l'eau dans le sol plutôt que sur les processus de sorption ou de dégradation des pesticides. La plante est succinctement représentée dans ces modèles qui ne permettent donc pas de simuler autre chose que le transfert des pesticides. Dans le cas d'une plate-forme de modélisation, la difficulté réside dans la simulation simultanée d'éléments (nitrate, pesticides) par des modèles différents ayant leur propre bilan hydrologique. Il devient alors difficile de comparer le transfert de solutés entre modèles car leurs bilans hydrologiques sont souvent différents. Le choix d'intégrer le transfert des pesticides dans le code de Stics est motivé par le fait que celui-ci permettra d'inclure la plante dans les interactions. Celles-ci sont notamment importantes dans le cas de processus d'interception (tous les pesticides ne sont pas appliqués au même stade de développement de la plante), de volatilisation à partir du feuillage et de lessivage vers le sol. Selon leurs propriétés physico-chimiques, certains pesticides sont également capables de pénétrer dans la plante et d'y être dégradés. Le choix d'un modèle de culture permettra d'intégrer par la suite ces fonctionnalités pour l'amélioration du transfert des pesticides. La configuration de couplage de Stics avec les modèles hydrologiques permet, à chaque pas de temps de la simulation, une interaction entre les différents modèles. Le bilan hydrologique dans le compartiment « sol » est celui de Stics. L'eau et les solutés sont directement transférés dans les autres compartiments. Ce modèle sera par la suite intégré dans la plate-forme de modélisation Eau-dyssée qui regroupe un ensemble de modèles hydrologiques et hydrogéologiques experts.

Dans un premier temps, l'intégration d'un module spécifique de dégradation et de sorption pour les pesticides est réalisée dans Stics dans une version rebaptisée Pesticides. Ce travail est développé dans le cadre de la thèse de Wilfried Queyrel. La dégradation est formalisée selon une cinétique d'ordre 1. L'adsorption et la désorption sont considérées comme des processus dominants dans le transfert des pesticides. La description mathématique de ces phénomènes reste difficile à mettre en œuvre de par la complexité des mécanismes impliqués et le caractère fortement hétérogène des différents composants du sol. Ils sont décrits dans le modèle selon deux approches : une relation instantanée à l'équilibre et réversible et une relation dite lente de cinétique d'ordre 1. Cette approche a été développée dans le modèle Agriflux (Larocque *et al.*, 1997) et permet de représenter la formation de résidus liés dans le sol. Le pesticide sous forme soluble est alors considéré comme un soluté et est transféré dans les couches élémentaires de Stics.

Pour évaluer le fonctionnement de Pestic, il est nécessaire de le confronter à des expérimentations de terrain. Dans le cas des pesticides, les données existent mais elles sont variées en termes de données acquises, de pesticide appliqué, de variables suivies. De plus, la difficulté et le coût de l'analyse ainsi que le volume d'eau nécessaire ne permet généralement pas d'avoir des suivis de concentrations dans la zone sous-racinaire fréquents. Par ailleurs, la diversité des approches (cases lysimétriques, carottes en champ, micro-lysimètres) et des mesures de paramètres des sols ne permettent pas de comparer directement tous les sites. Un premier travail de mise en forme des données est donc nécessaire.

Pestic a été testé sur des jeux de données obtenus dans le cadre d'études précédentes. Il s'agit de sites situés à Kerlavic (Guimont, 2005), à Grignon (Baer, 1996) et Vredepeel (Boesten et van de Pas, 1999). Les simulations ont concerné dans un premier temps le bilan hydrique et les bromures. Les pesticides testés sont respectivement l'isoproturon, l'atrazine et la bentazone. Les premiers résultats sont en cours d'acquisition et seront présentés au séminaire.

Références bibliographiques

- Baer U., 1996 - Comportement des pesticides dans les sols : Evaluation et simulation de la dissipation au champ. Thèse de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, 155 p.
- Boesten J.J.T.I., van de Pas L.J.T., 1999 - Movement of water , bromide ion and the pesticides ethoprophos and bentazone measured in a sandy soil in Vredepeel (The Netherlands), Technical report, Alterra wur, The Netherlands, 97 p.
- Guimont S., 2005 - Devenir des pesticides dans les sols en fonction de l'état d'humidité et du mode de circulation de l'eau dans le sol. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 215 p.
- Larocque M., Banton O., Lafrance P., 1997 - Simulation par le modèle AgriFlux du devenir de l'atrazine et du dééthylatrazine dans un sol du Québec sous maïs sucré. *Revue des sciences de l'eau*, 11, 191-208.

SIMULATION DES ÉMISSIONS DE N₂O PAR LES SOLS : PROPOSITIONS D'AMÉLIORATION DE MODULOSTICS ET ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE

Joël Léonard¹, Nicolas Beaudoin¹, Michel Cariolle², Jean-Pierre Cohan³, Cécile Le Gall⁴, Bruno Mary¹, Elisabeth Pattey⁵, Yves Python⁶

¹ INRA, US 1158 AgrolImpact, F-02000 Barenton-Bugny, France

² ITB, F-75008 Paris, France

³ Arvalis Institut du végétal, F-44370 La-Chapelle-Saint-Sauveur, France

⁴ CETIOM UMT GES-N₂O, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁵ Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Canada

⁶ AgroParisTech, Ferme Expérimentale, Projet Grignon Energie Positive, F-78850 Thiverval-Grignon, France

Mots-clés

ModuloStics, nitrification, dénitrification, azote, N₂O

Introduction

Dans ModuloStics, la simulation des émissions de N₂O à partir des processus de nitrification et de dénitrification s'appuie sur le modèle NOE (Hénault *et al.*, 2005). Compte tenu de l'enjeu et de la difficulté à prédire les émissions de N₂O par les sols cultivés et en fonction des pratiques, nous cherchons à améliorer ce module et à l'évaluer sur des mesures d'émissions de N₂O au champ.

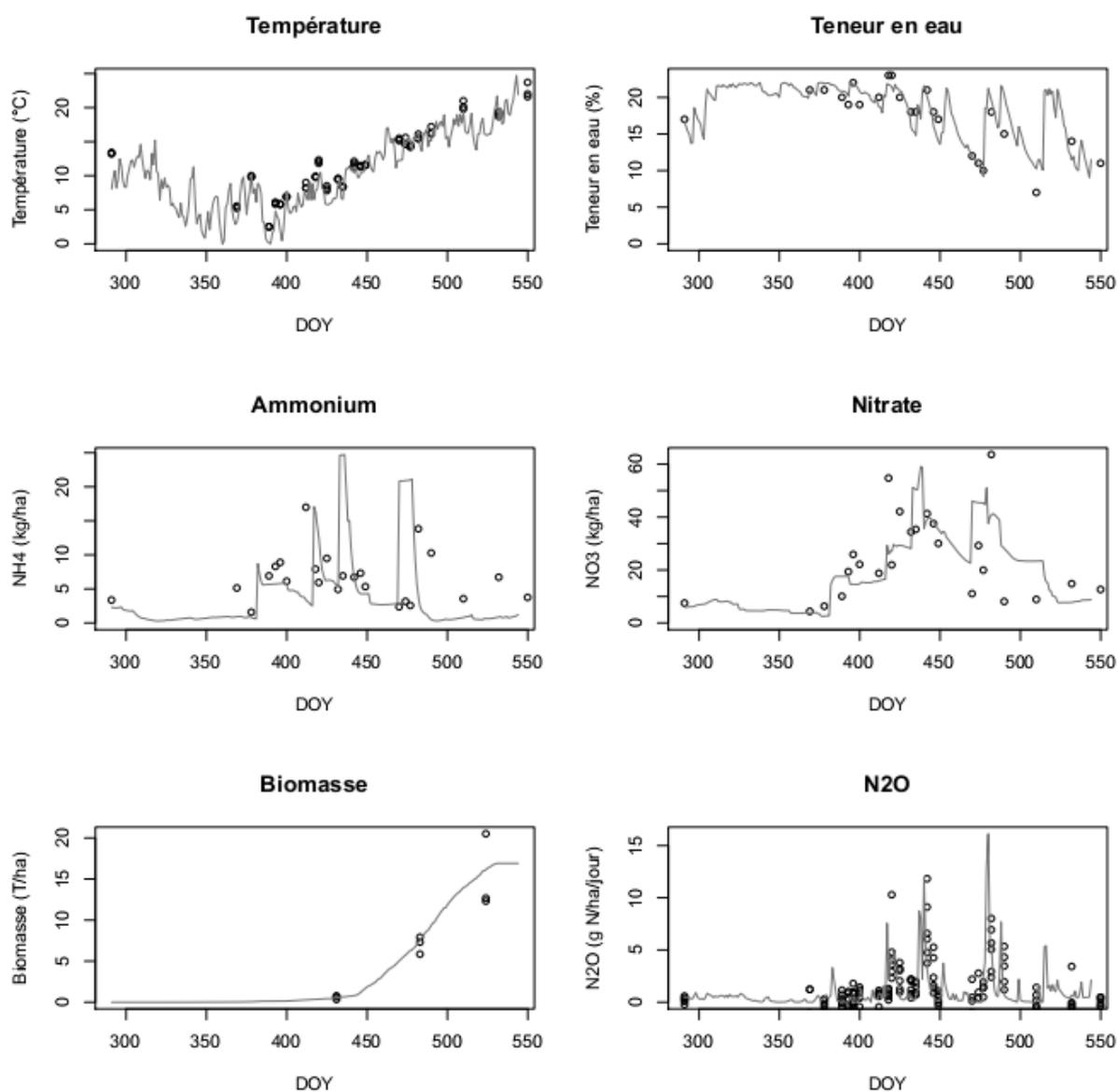
Formalismes et évaluation

Les modifications que nous proposons concernent i) la description de la dynamique de la teneur en eau en surface, qui conditionne fortement la dénitrification ; ii) les processus de nitrification et dénitrification eux-mêmes, et en particulier la fraction molaire de N₂O produit pour chacun de ces processus, qui est susceptible de varier en fonction des conditions d'aération par exemple. La manière dont sont décrits les transferts d'eau dans Stics (hors option « macroporosité ») implique que la teneur en eau ne dépasse pas la capacité au champ. Celle-ci correspond sensiblement au taux de saturation seuil au-delà duquel la dénitrification devient active. C'est une limite très importante pour la simulation des émissions de N₂O par dénitrification. Nous proposons une alternative à l'utilisation de l'option « macroporosité », sans remettre en cause la description des transferts d'eau dans Stics (qui reste inchangée à l'échelle journalière) en incorporant un sous module de drainage fonctionnant à l'échelle infra journalière et uniquement pour les couches de surface saturées après une pluie. Ce sous module est actuellement utilisé pour la dénitrification uniquement. L'amélioration de la description de la dénitrification et du calcul de la fraction de N₂O produite par la nitrification et la dénitrification (fractions supposées constante dans ModuloStics) s'appuie sur une analyse de la littérature ainsi que sur la remobilisation d'expérimentations de laboratoire (Bessou *et al.*, 2010). Nous avons en particulier introduit le fait que la fraction molaire de N₂O dépend fortement du taux de saturation en conditions très humides pour la nitrification, et à la fois du taux de saturation et de la concentration en nitrate pour la dénitrification.

L'évaluation de ces modifications est en cours sur un ensemble de 5 jeux de données correspondant à différents contextes pédoclimatiques : En Crambade (31), Grignon (78), Morville (88), Estrées-Mons (80) et Ottawa (Canada), les trois premiers étant issus du projet NOGAS porté par l'UMT GES-N₂O. Les jeux de données mobilisés ont l'avantage de permettre d'évaluer d'une part la capacité de Stics à simuler la dynamique des variables de contrôle des émissions (eau, température, azote minéral) et d'autre part sa capacité à simuler l'ordre de grandeur des émissions et à restituer l'amplitude et le

timing des pics d'émissions. Ces tests ont été réalisés avec un jeu de paramètres unique pour la nitrification et la dénitrification, et non optimisé.

Figure 1 - Cinétiques observées (cercles) et simulées par Stics (trait continu) pour les variables de contrôle des émissions et les flux de N₂O. De gauche à droite et de haut en bas : température, teneur en eau, NH₄ et NO₃ (15 premiers cm de sol), biomasse aérienne et émissions de N₂O. Site NOGAS de En Crambade (31). DOY = Day Of Year (jours juliens, cumulés pour la seconde année).



Résultats

Les résultats montrent tout d'abord une bonne capacité du modèle, avec le paramétrage standard, à simuler les variables intermédiaires : température, teneur en eau, NH₄ et NO₃. Cela permet d'asseoir sur de bonnes bases la simulation des émissions de N₂O. L'ordre de grandeur des émissions de N₂O simulées est généralement correct, malgré le fait que les potentiels de nitrification et dénitrification soient gardés constants pour l'ensemble des simulations. L'amplitude et le timing des pics d'émissions sont souvent bien restitués, même si certains pics d'émission simulés n'ont pas été observés (période d'échantillonnage de 15 jours environ en moyenne). L'introduction d'une gestion plus fine des transferts d'eau en surface après les pluies jouent un rôle majeur pour obtenir de bons

résultats sur l'ampleur et le timing des émissions, la dénitrification contribuant à 23-85 % des émissions totales, et largement aux pics suivant les épisodes pluvieux.

Conclusion

Ces évaluations préliminaires ont permis de montrer :

- que ModuloStics et son paramétrage standard ont une bonne capacité à simuler la dynamique des variables intermédiaires contrôlant les émissions,
- que les modifications apportées améliorent significativement la simulation des émissions, à la fois en termes d'émissions totales et de restitution de leur dynamique. L'introduction d'une gestion fine des transferts d'eau en surface les jours de pluie joue un rôle important dans cette amélioration, en particulier lorsque les émissions par dénitrification dominent.

Ces résultats posent toutefois des questions. Les variables abiotiques (température, eau, azote minéral) expliquent largement les variations d'émissions entre sites, sans qu'il ne soit nécessaire de faire varier le potentiel de nitrification, de dénitrification ou de réduction du N₂O entre les sites ou les sols. Il s'agit d'un résultat relativement inattendu compte tenu de la variabilité souvent observée de ces caractéristiques lorsqu'elles sont mesurées.

Références bibliographiques

- Hénault C., Bizouard F., Laville P., Gabrielle B., Nicoulaud B., Germon J.-C., Cellier P., 2005 - Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology*, 11(1), 115-127.
- Bessou C., Mary B., Léonard J., Roussel M., Gréhan E., Gabrielle B., 2010 - Modelling soil compaction impacts on N₂O emissions in arable fields. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 348-363.

SESSION 4

Contribution de Stics à des problématiques de changement d'échelle ou de couplage

Animateur : M. Launay

AGROSYSTEMES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE CONTINENTALE : LE POINT DE VUE DE CLIMATOLOGUES

Nathalie de Noblet, Nicolas Vuichard

CEA, UMR 8212 LSCE, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

CNRS, UMR 8212 LSCE, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

Université de Versailles Saint-Quentin, UMR 8212 LSCE, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

Mots-clés

Changement climatique, agrosystème, Stics, Orchidée, couplage

De nombreux groupes de recherche se sont essayés, ces dernières années, à proposer des trajectoires possibles d'évolution de la productivité agricole à l'échelle de continents ou de grandes régions, voire globale. Différentes méthodes sont utilisées pour cela : modélisation statistique (e.g. Lobell et Burke, 2010 ; Lobell *et al.*, 2011), modèles globaux de végétation (e.g. Müller *et al.*, 2010 ; Berg *et al.*, 2011), extrapolation spatio-temporelle à partir de modèles spécifiques à l'échelle de la parcelle (e.g. Parry *et al.*, 2005), définition de zones agro-écologiques (e.g. Fischer *et al.*, 2002). La plupart de ces études se sont en priorité attachées à évaluer les risques de pertes/gains en productivité agricole, mais plus rarement les changements concernant l'ensemble du cycle cultural (évolution des dates de semis/récoltes, risques de dysfonctionnement à certaines périodes clés du cycle cultural, risques liés à une variation des stress hydriques et/ou thermiques, etc.). De telles études sont plutôt conduites à des échelles plus locales (http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/). Or les outils dont nous disposons aujourd'hui pour travailler sur de très vastes territoires sont plus fiables dans leur représentation du fonctionnement des écosystèmes que dans celle de l'élaboration du rendement ! Dans le cadre du projet ANR-ORACLE (<http://oracle.lsce.ipsl.fr/>), auquel participent de nombreux partenaires Inra, nous proposons la séquence suivante pour aborder la problématique des impacts du changement climatique sur les systèmes agricoles :

- Définir et produire un ensemble d'indicateurs d'évolution du fonctionnement des écosystèmes, permettant de pointer sur des régions « sensibles » à certaines trajectoires du climat à venir ;
- Faire tourner des modèles spécifiques (comme Stics par exemple) uniquement sur ces régions à risque ou d'opportunité pour affiner la quantification des impacts à venir.

Cette méthodologie aurait l'avantage de combiner les spécificités respectives des modèles dits globaux et des modèles dits d'impacts, sans chercher à extrapoler au-delà du raisonnable les résultats des uns ou des autres.

L'incorporation d'une meilleure représentation (paramétrisation) des écosystèmes anthropiques dans les modèles globaux de la biosphère continentale reste cependant d'actualité. Si l'élaboration du rendement n'est pas le but recherché par une telle amélioration, une simulation correcte du cycle saisonnier des écosystèmes est la base d'une bonne représentation des flux d'eau, de chaleur, d'énergie, de CO₂, etc., à l'interface surface-atmosphère, et ainsi la base d'une simulation correcte de l'impact de l'occupation des sols sur le système climatique. C'est dans ce but que nous avons couplé notre modèle global de végétation Orchidée (Krinner *et al.*, 2005) à Stics (e.g. Gervois *et al.*, 2004). Notre regard sur ce couplage aujourd'hui est assez critique et mérite qu'une discussion ouverte soit lancée sur la façon de prendre en compte l'agriculture dans de tels modèles.

Références bibliographiques

- Berg A., de Noblet-Ducoudré N., Sultan B., 2011 - Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions. *Agriculture and Forest Meteorology*, doi:10.1016/j.agrformet.2011.12.003.
- Fischer G., van Velthuizen H., Shah M., Nachtergaele F. 2002 - Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results. *IIASA report*, <http://webarchive.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/RR-02-002.pdf>.
- Gervois S., Viovy N., de Noblet-Ducoudré N., Ciais P., Brisson N., Seguin B., 2004 - Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interactions*, 8, paper N°16.
- Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudré N., Ogée J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Polcher J., Prentice I.C., 2005 - A dynamical global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199.
- Lobell D., Burke M., 2010 - On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1443-1452, doi:10.1016/j.agrformet.2010.07.008.
- Lobell D., Schlenker W., Costa-Roberts J., 2011 - Climate Trends and Global Crop Production since 1980. *Science*, 333, 616-620 ; DOI: 10.1126/science.1204531.
- Müller C., Bondeau A., Popp A., Waha K., Fader M., 2010 - Climate change impacts on agricultural yields. *Background note to the World Development Report 2010*. http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2010/Resources/5287678-1255547194560/WDR2010_BG_Note_Mueller.pdf
- Parry M., Rosenzweig C., Livermore M., 2005 - Climate change, global food supply and risk of hunger. *Philosophical Transactions of the Royal Society of Biological sciences*, 360, 2125–2138. doi:10.1098/rstb.2005.1751.

ESTIMATION DES PROPRIÉTÉS DES SOLS PAR INVERSION DU MODÈLE STICS

Sreelash Krishnan Kutty¹, Muddu Sekhar¹, Laurent Ruiz², **Samuel Buis**³, Martine Guérif³, Sat Kumar Tomer⁴, Soumya Bandyopadhyay⁵, Patrick Durand², Chantal Gascuel-Odoux², Françoise Ruget³

¹ Indian Institute of Science, Dept of Civil Eng, 560012 Bangalore, Inde

² INRA, UMR 1069 SAS, 35000 Rennes, France

³ INRA, UMR 1114 EMMAH, 84914 Avignon, France

⁴ CESBIO, 31410 Toulouse, France

⁵ ISRO, EOS, 560012 Bangalore, Inde

Mots-clés :

Propriétés des sols, inversion de modèle, télédétection

L'estimation des propriétés des sols est un problème critique lorsqu'on s'intéresse à la modélisation de la végétation ou de l'hydrologie à des échelles spatiales supérieures à la parcelle. Ainsi l'incertitude sur la connaissance de ces paramètres est responsable d'une grande part de la variabilité des résultats pour les modèles de culture (Pachepsky et Acock, 1997 ; Lawless *et al.*, 2008).

Ces paramètres peuvent être estimés en utilisant différentes techniques : analyse des sols en différents points échantillonnés, carte des sols et application de fonction de pédotransfert, images de télédétection (Lagacherie *et al.*, 2008) ou mesure de résistivité électrique (Bourennane *et al.*, 2007) et application de fonctions de transfert empiriques. La première méthode est difficile à utiliser en raison de limitations pratiques et de son coût. Des cartes de sols suffisamment précises à l'échelle d'un bassin versant sont rares et l'utilisation de la télédétection ou de la résistivité électrique est encore limitée par un manque de robustesse de l'interprétation des signaux (Lagacherie *et al.*, 2008). De plus, ces techniques ne fournissent pas toujours directement les valeurs des paramètres utilisés dans les modèles.

L'estimation des propriétés des sols par inversion de modèle (de végétation ou hydrologique) a été testée dans différentes études en utilisant soit des observations d'humidité de surface (Vereecken *et al.*, 2008 ; Ines et Mohanty, 2008 ; Montzka *et al.*, 2011) soit des observations de végétation (Varella *et al.*, 2010). Cependant, ces études ont montré que dans ces configurations, soit seules les propriétés de surface étaient accessibles, soit la qualité d'estimation des propriétés des sols était très dépendante des conditions climatiques et de la culture observée.

Nous proposons dans cette étude de montrer la complémentarité de ces deux types d'observations en les utilisant simultanément pour estimer les propriétés hydriques des sols de la surface à la profondeur racinaire par inversion du modèle de culture Stics. L'inversion est basée dans cette étude sur une méthode de type GLUE (Beven et Binley, 1992).

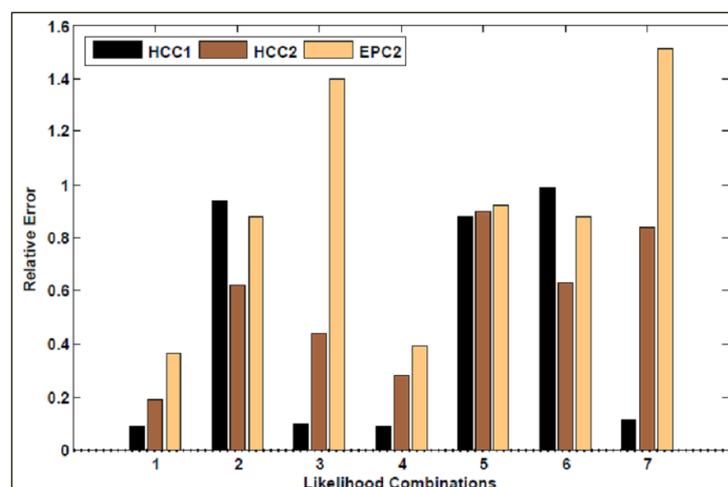
L'intérêt de combiner ces types d'observations a d'abord été montré sur une série d'expériences synthétiques comprenant des sols variés pour une culture de maïs (Sreelash *et al.*, 2012). Les résultats obtenus montrent que la qualité des estimations est nettement meilleure lorsque des observations d'humidité de surface et de végétation sont utilisées simultanément par rapport à l'utilisation d'un seul de ces types d'observation (figure 1).

L'application de cette méthodologie sur des données réelles en utilisant des mesures in-situ est en cours sur une large base de données composée d'expérimentations sur différents types de sols et de

culture, sur des sites expérimentaux en Inde et en France. Les premiers résultats sont en accord avec ceux obtenus sur les expériences synthétiques.

Kim *et al.* (2012) ont montré que les mesures issues de satellites radar pouvaient être utilisées pour estimer des indices de végétation comme l'indice foliaire. Par ailleurs, l'humidité de surface peut également être estimée à partir de ce type de mesures. Nous proposons de montrer sur une série de sites expérimentaux l'impact de l'utilisation de mesures issues de satellites radar sur l'estimation des propriétés des sols par rapport à l'utilisation de mesures in-situ de végétation et d'humidité de surface.

Figure 1 - Erreur (relativement à celle de l'information a priori) sur les paramètres estimés (HCC1 : humidité à la capacité au champ de l'horizon 1 ; HCC2 : humidité à la capacité au champ de l'horizon 2 ; EPC2 : épaisseur de l'horizon 2) en fonction des jeux d'observations utilisés pour l'inversion (1 : Humidité de Surface (HS) + Indice Foliaire (LAI) + Biomasse (BM) ; 2 : LAI + BM ; 3 : HS + LAI ; 4 : HS + BM ; 5 : LAI ; 6 : BM ; 7 : HS).



Références bibliographiques

- Beven K.J., Binley A. M., 1992 - The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6, 279-298.
- Bourennane H., King D., Couturier A., Nicoullaud B., Mary B., Richard G., 2007 - Uncertainty assessment of soil water content spatial patterns using geostatistical simulations: An empirical comparison of a simulation accounting for single attribute and a simulation accounting for secondary information, *Ecological Modelling*, 205(3-4), 323-335.
- Ines A. V. M., Mohanty B. P. 2008 - Near-Surface soil moisture assimilation for quantifying effective soil hydraulic properties under different hydroclimatic conditions. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 39-52.
- Kim Y., Jackson T., Bindlish R., Hoonyol Lee, Sukyoung Hong, 2012 - Radar Vegetation Index for Estimating the Vegetation Water Content of Rice and Soybean. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4), 564-568. doi: 10.1109/LGRS.2011.2174772
- Lagacherie P., Baret F., Feret J.-B., Madeira Netto J., Robbez-Masson J.-M., 2008 - Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements, *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 825-835.
- Lawless C., Semenov M. A., Jamieson P. D., 2008 - Quantifying the effect of uncertainty in soil moisture characteristics on plant growth using a crop simulation model, *Field Crops Research*, 106(2), 138-147.

- Montzka C., Moradkhani H., Weihermüller L., Hendricks Franssen H., Canty M., Vereecken H., 2011 - Hydraulic parameter estimation by remotely-sensed top soil moisture observations with the particle filter, *Journal of Hydrology*, 399(3–4), 410-421.
- Pachepsky Y., Acock B., 1997 - Stochastic imaging of soil parameters to assess variability and uncertainty of crop yield estimates, *Geoderma*, 85, 213-229.
- Sreelash K., Sekhar M., Ruiz L., Tomer S. K., Guérif M., Buis S., Durand P., Gascuel-Oudou C., 2012 - Parameter estimation of a two-horizon soil profile by combining crop canopy and surface soil moisture observations using GLUE. *Journal of Hydrology*, 456-457, 57-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.012>
- Varella H, Guérif M, Buis S, Beaudoin N., 2010 - The estimation of soil properties using observations on crop biophysical variables and the crop model STICS improves the predictions of agro-environmental variables. *European Journal of Agronomy*, 33(2), 139-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2010.04.005>
- Vereecken H., Huisman J. A., Bogen H., Vanderborght J., Vrugt J.A., Hopmans J.W., 2008 - On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: a review. *Water Resources Research* 44, doi:10.1029/2008WR006829.

PERFORMANCE DE STICS A PREDIRE LA PRODUCTIVITE DU MAÏS GRAIN EN REPONSE AUX VARIATIONS CLIMATIQUES DANS L'EST DU CANADA.

1) REINITIALISATION A L'AIDE DU LAI EXTRAIT DE LANDSAT POUR PREDIRE DES RENDEMENTS SPATIALISES ; 2) SIMULATION DE LA REPONSE A LA FERTILISATION AZOTEE

*Elizabeth Pattey*¹, *Guillaume Jégo*², *Julie Sansoulet*¹, *Jiangui Liu*¹, *Isabelle Duchesne*⁴, *Nicolas Tremblay*³,
*Nicolas Beaudoin*⁵

¹ *Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Canada*

² *Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, Canada*

³ *Agriculture et Agroalimentaire Canada, Saint-Jean-sur-Richelieu, Canada*

⁴ *La Financière agricole du Québec, St-Romuald, Canada*

⁵ *INRA, US 1158 Agro-Impact, F-02000 Barenton-Bugny, France*

Mots clés :

Variabilité climatique, stress hydrique, prédiction de rendement du maïs, fertilisation azotée

La variabilité climatique a une grande influence sur les conditions saisonnières de la croissance des cultures en champ et sur la productivité interannuelle. Les tendances d'évolution climatique de l'Est du Canada démontrent une probabilité accrue de déficit pluviométrique durant la saison de croissance (Bootsma *et al.*, 2004). Les champs de maïs (*Zea mays* L.) de cette région n'étant pas irrigués, ils sont sujets à des stress hydriques intermittents, dont l'amplitude est modulée par les propriétés du sol. Une meilleure prise en compte des contraintes hydriques devrait permettre de réviser à la baisse les recommandations en engrais azotés du maïs non irrigué. En effet, des rendements similaires ont été obtenus dans du maïs non irrigué ayant reçu une dose d'azote inférieure de 40 % à la dose recommandée lors de déficits hydriques observés en juillet et en août (Pattey *et al.*, 2001).

1) Prédiction des rendements spatialisés par réinitialisation de variables d'entrée de Stics à l'aide du LAI extrait de Landsat

Le modèle de culture Stics (Brisson *et al.*, 1998 ; 2002) a le potentiel de prédire à la fois la productivité de cultures agricoles sur un pas de temps journalier et d'établir des bilans environnementaux. De plus, il a la capacité d'assimiler des données d'indice de surface foliaire (LAI) pour soit réinitialiser certaines variables d'entrée, soit forcer le modèle avec le LAI mesuré (e.g., Guéris et Duke, 2000). La réinitialisation de variables d'entrée permet de dériver des informations spatialisées telles que la date et la densité de semis, et la teneur en eau à capacité au champ qui ne sont pas faciles d'accès à l'échelle régionale (Prévot *et al.*, 2003), alors que les résultats du modèle y sont très sensibles (e.g., Ruget *et al.*, 2002). Lors de l'adaptation du modèle Stics aux brèves saisons de croissance de l'Est du Canada, nous avons montré qu'en ne définissant dans Stics que deux cultivars virtuels de maïs variant par leur exigence en degrés-jours de croissance, la majeure partie de l'écozone des Plaines à forêts mixtes pouvait être bien représentée (Jégo *et al.*, 2011). La performance de Stics aux variations climatiques a aussi été vérifiée à l'aide d'une série temporelle de dix ans incluant des champs non irrigués de blé de printemps, maïs et soja de l'Est du Canada (24 jeux de données - années x champs) et en utilisant la réinitialisation de variables d'entrée par assimilation du LAI extrait des données de télédétection (Jégo *et al.*, 2012). Cette étude a confirmé que : 1) la réinitialisation de la date de semis était le facteur qui contribuait le plus à l'amélioration des prédictions de biomasse et de rendement ; 2) la réinitialisation de la date et de la densité de semis

ainsi que de la teneur en eau à capacité au champ par assimilation d'au moins quatre cartes de LAI, donnait des prédictions non biaisées et très proches des prédictions obtenues avec les données d'entrée réelles ; 3) les unités homogènes de simulation pouvaient être définies avec les contours de champ sur lesquels la texture du sol était superposée.

Nous avons aussi voulu vérifier la performance des prédictions spatialisées de rendement de champs de maïs d'une petite région. Nous avons utilisé les données de rendement mesuré de 27 producteurs en 2003, de 33 producteurs en 2007 et de 32 producteurs en 2009 acquises en Montérégie par la Financière agricole du Québec pour sa protection collective d'assurance récolte. Cette région est caractérisée par une grande variation de la texture des sols (de 11 à 51 % de teneur en argile selon la carte des sols). Les données climatiques provenaient d'une station météorologique située au centre de la région. Des images traitées de Landsat TM/ETM+ (4-6 par saison ; Liu *et al.*, 2012) ont été utilisées pour extraire le LAI selon la méthode proposée par Baret et Guyot (1991) à partir du MTVI2 (modified triangular vegetation index ; Haboudane *et al.*, 2004). Les prédictions de rendement suite à la réinitialisation étaient assez bien corrélées aux observations, mais la dispersion des rendements prédits était de l'ordre de 15 à 20 % (relative RMSE). Les dates de semis réinitialisées, quant à elles, coïncidaient bien à ± 2 jours près aux dates réelles. En prenant en compte la distance des champs à la station météorologique, nous avons trouvé une relation entre l'accroissement de la dispersion des rendements prédits et la distance des champs à la station météorologique. L'absence de prise en compte de la distribution spatiale des précipitations semble être le facteur en cause. Il faudrait une grille de distribution des données climatiques plus fine (de l'ordre de $5 \times 5 \text{ km}^2$) (Jégo *et al.*, 2013).

2) Résultats préliminaires de la simulation de la réponse à la fertilisation azotée

Nous avons conservé la courbe de dilution de l'azote implantée dans Stics (Plénet et Lemaire, 1999) puisque Ziadi *et al.* (2008) ont trouvé que le maïs cultivé dans l'Est du Canada avait une courbe de dilution semblable. Les modules de macroporosité, de la nitrification et de la dénitrification ont été activés. Les paramètres de l'évaporation ont été révisés. Une analyse de régression multiple des données de productivité du maïs a été réalisée en fonction des précipitations, de la température et de l'ensoleillement. En absence d'excès ou de manque d'eau, l'augmentation de la fumure azotée a généré une augmentation non linéaire du rendement et de l'azote des grains avec atteinte d'un plateau autour de 160-200 kg N ha⁻¹. En condition de stress hydrique, la réponse à l'azote a été faible voire nulle : les rendements sont restés relativement constants. La précipitation cumulée a eu le plus d'impact sur la biomasse et le rendement (25 %) alors que le taux d'azote a eu le plus d'impact sur le contenu en azote de la plante (63 %). Les simulations de Stics ont donné des prédictions acceptables (4 % < erreur moyenne < 18 % pour la biomasse). Des simulations sur 29 années climatiques d'Ottawa à 6 taux d'application d'azote (0, 50, 100, 150, 200, 250 kg N ha⁻¹) pour le maïs ont été effectuées afin d'évaluer l'influence des variations climatiques et des taux d'application d'azote sur la productivité du maïs. Une courbe de réponse du rendement en fonction des précipitations et du taux d'application d'azote a pu être établie avec le logiciel Statistica. Dans la région d'Ottawa, seules 10 % des années ne présentaient aucun stress hydrique, 38 % des déficits légers et 52 % des déficits conséquents. En prenant la dérivée seconde de la relation exprimant le rendement en fonction des précipitations et de la dose d'azote, pour un seuil économique de la région d'environ 176 kg N ha⁻¹ permettant d'atteindre un rendement de 9,6 t ha⁻¹, une réduction de la fertilisation allant de 16 et 38 kg N ha⁻¹ peut être envisagée pour mieux intégrer l'influence du climat. La prochaine étape vise à étendre l'analyse sur 50 ans et à d'autres sites représentatifs de l'écozone des Plaines à forêts mixtes.

Références bibliographiques

Baret F., Guyot G., 1991 - Potential and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.

- Bootsma A., Anderson D., Gameda S., 2004 - Potential Impacts of Climate Change on Agroclimatic Indices in Southern Regions of Ontario and Quebec. AAFC Technical bulletin, ECORC Contribution# 03-284
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311–346.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002 - STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22, 69–92.
- Guérif M., Duke C.L., 2000 - Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, 57–69.
- Haboudane D., Miller J. R., Pattey E., Zarco-Tejada P.J., Strachan I.B., 2004 - Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3), 337-352.
- Jégo G., Pattey E., Bourgeois G., Tremblay N., Drury C.F., 2011 - Calibration and performance evaluation of a corn cultivars adapted to Eastern Canada in the STICS crop model. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 557-570.
- Jégo G., Pattey E., Liu J., 2012 - Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops. *Field Crop Research*, 131, 63-74.
- Jégo G., Pattey E., Liu J., Duchesne I., 2013 - Regional corn yield predictions and agro-environmental assessment using Leaf Area Index retrieved from remote sensing into STICS crop model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Submitted
- Liu J., Pattey E., Jégo G., 2012 - Assessment of vegetation indices for regional green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons. *Remote Sensing of Environment*, 123, 347-358.
- Pattey E., Strachan I.B., Boisvert J.B., Desjardins R.L., McLaughlin N.B., 2001 - Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyperspectral reflectance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 85-99.
- Plenet D., Lemaire G. 1999 - Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil*, 216(1-2), 65-82
- Prévoit L., Chauki H., Troufleau D., Weiss M., Baret F., Brisson N., 2003 - Assimilating optical and radar data into the STICS crop model for wheat. *Agronomie*, 23, 297-303.
- 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.
- Ziadi N., Brassard M., Bélanger G., Cambouris A.N., Tremblay N., Nolin M.C., Claessens A., Parent L.-E., 2008 - Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in eastern Canada. *Agronomy Journal*, 100(2), 271-276.

MULTISIMULATIONS STICS SUR DES TERRITOIRES REGIONAUX POUR CARACTERISER LA PRODUCTION VEGETALE ET LES ECHANGES HYDRIQUES AVEC LE MILIEU

André Chanzy¹, Philippe Clastre¹, Sébastien Garrigues¹, Albert Olioso¹, Hélène Raynal²

¹ INRA, UMR 1114 EMMAH, 84914 Avignon, France

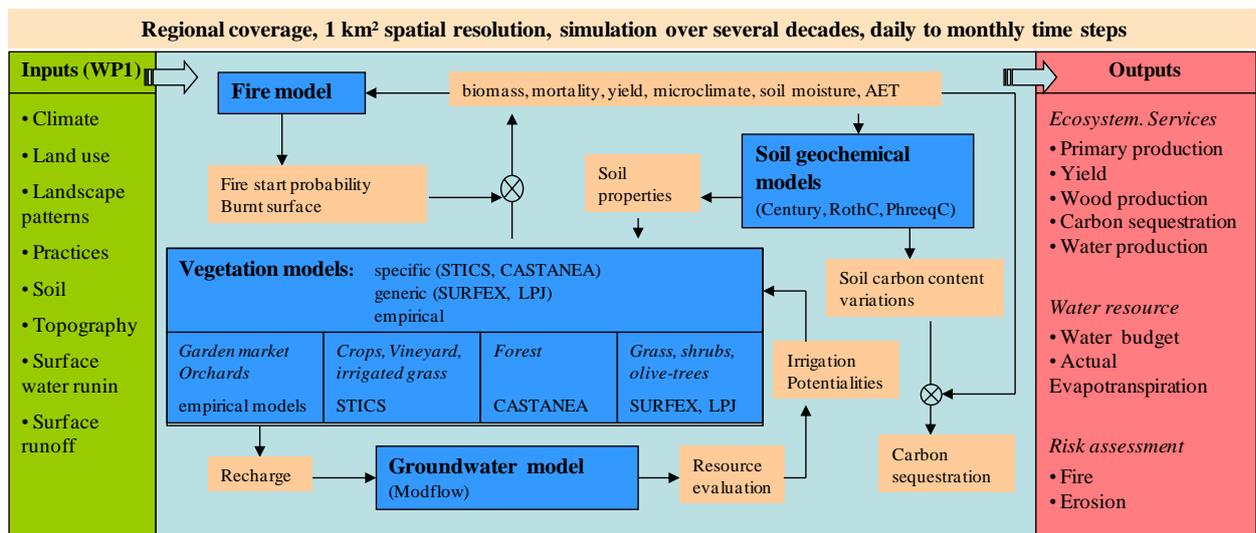
² INRA, UR 875 BIA, F-31326 Castanet-Tolosan, France

Mots-clés :

Production végétale, ressource en eau, échelle régionale

L'impact des changements climatiques et les voies d'adaptation peuvent se traiter à différentes échelles spatiales. A l'échelle régionale, un des enjeux sera de déterminer les capacités de production végétale et de déterminer les ressources hydriques nécessaires à la production agricole et celles qui seront disponibles. Cela suppose, au niveau du territoire, de représenter ces termes en tenant compte de la variabilité du complexe agro-pédoclimatique. Dans le projet Vigie-Med (financé par le méta-programme Accaf), nous envisageons de construire un simulateur régional donnant des indicateurs représentatifs des services écosystémiques selon le schéma conceptuel donné dans la figure 1. L'enjeu est de pouvoir représenter les différents systèmes de production végétale et de les coupler avec des modèles de nappe pour évaluer la ressource hydrique, des modèles de risque (incendie) ou des modèles biogéochimiques pour simuler la dynamique du carbone dans les sols et ainsi appréhender le rôle des systèmes de production dans l'atténuation des gaz à effet de serre.

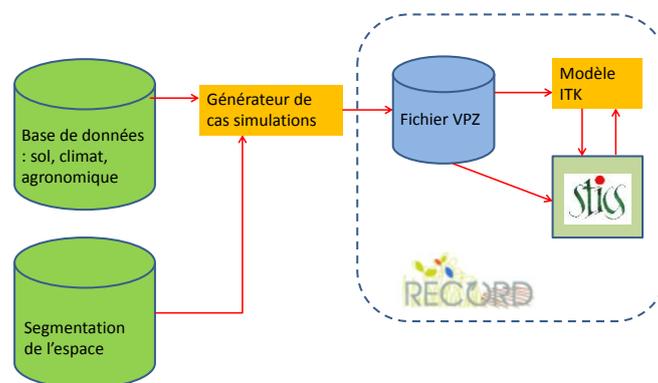
Figure 1 - Schéma de couplage des modèles pour simuler les différents indicateurs de production végétale, de vulnérabilité aux perturbations et de durabilité des ressources hydriques



Les grandes cultures, la vigne et les prairies irriguées seront représentées en utilisant le modèle Stics. Des unités de simulation résultant du croisement des cartes de sols, de climat et des systèmes de production végétale seront définies. Au niveau de chacune d'elles, on réalise une ou plusieurs simulations pour représenter la production végétale et éventuellement la variabilité au sein de l'unité. Cela suppose d'être en mesure d'enchaîner un grand nombre de simulations. Pour cela,

l'approche « MultiSimLib » qui permet d'enchaîner des simulations en définissant les différents cas dans un tableau, sera transposée à l'environnement Record. Une des difficultés sera de prescrire les itinéraires techniques sur chaque unité de simulation. Il y a là un travail conceptuel devant conduire à la formalisation d'itinéraires techniques de référence. Certaines des opérations agricoles résultantes dépendront du climat (Lecerf *et al.*, 2012) et de l'état du système (teneur en eau et température du sol). Pour pouvoir réaliser des simulations sur de longues séries climatiques, il est important de pouvoir garder une souplesse pour adapter les calendriers culturels aux climats rencontrés. Le modèle Stics sera ainsi combiné sous Record à des générateurs d'itinéraires techniques qui représenteront les processus de décision s'appuyant sur le climat mais également sur l'état du système simulé par Stics. L'architecture du simulateur territorial Stics est donnée sur la figure 2 et requiert le développement de deux modules (« générateur de cas de simulation » et le « modèle ITK »).

Figure 2 - Schéma du simulateur permettant les multi-simulations avec Stics



Le projet Vigie-Med étant dans sa phase de démarrage, nous présenterons la démarche générale et les options prises pour la spatialisation des paramètres de Stics. Les différents exercices de simulation seront décrits (analyse de sensibilité, validation, scénarios sur les changements globaux). Enfin, quelques résultats préliminaires seront donnés.

Références bibliographiques

Lecerf R., Chanzy A., Oliosio A., Hadria R., Ruget F., Lecharpentier P., 2012 - Simulation prospective du drainage et des rendements des prairies irriguées à l'échelle de l'aquifère de la Crau. *Séminaire Stics*, Sainte-Montaine, 17-19 octobre 2012.

SESSION POSTERS

ADAPTATION DE STICS A LA CULTURE DE CANOLA AU CANADA A PARTIR DU MODULE COLZA EN VUE DE SIMULER LES EMISSIONS DE N₂O PAR MODULOSTICS

*Nicolas Beaudoin¹, Julie Sansoulet², Elizabeth Pattey², Cynthia Grant², Robert Blackshaw², Neil Harker²,
Eric Johnson², John O'Donovan², Sébastien Gervois³*

¹ INRA, US 1158 Agro-Impact, F-02000 Barenton-Bugny, France

² Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, Ottawa, Canada

³ CETIOM, F-78850 Thiverval-Grignon, France

Mots-clés :

canola, colza, optimiStics, généricité, cultivar, bilan d'azote

Introduction

Les cultures de colza ou canola sont importantes pour la consommation humaine, la production de biodiesel ou d'huiles mécaniques et la production de tourteaux. La production de canola/colza en 2010 était de 13,1 Mt en Chine, 11,8 Mt au Canada, 6,4 Mt en Inde, 5,7 Mt en Allemagne et 4,8 Mt en France (source : statistiques FAO). Presque toutes les variétés de canola cultivées au Canada sont issues du colza de printemps à faible taux d'acide érucique et de glucosinolates. L'espèce est *Brassica napus*, et plus rarement, *B. rapa* ou *B. juncea*. L'apport important d'engrais d'azoté (>100 kg N ha⁻¹) sur le colza et le canola au début de la saison peut favoriser l'émission de protoxyde d'azote (N₂O), puissant gaz à effet de serre dont les pics d'émissions surviennent après la pluie (e.g., Metivier *et al.*, 2009). La modélisation de la demande en azote de la culture à l'aide de Stics peut aider à maîtriser les émissions de N₂O ainsi que les pertes de nitrate par lessivage à l'échelle parcellaire par une meilleure gestion des apports azotés. Le couplage de Stics à des données issues de la télédétection permet d'extrapoler à l'échelle régionale l'évaluation environnementale des productions agricoles (Jégo *et al.*, 2012 ; Pattey *et al.*, 2012).

Le module plante de Stics pour le colza d'hiver (*Brassicae napus*) a été adapté aux conditions françaises (Beaudoin *et al.*, 1998 ; Roche, 2000 ; Beaudoin *et al.*, 2008). Or la base de données ayant servi à l'étalonnage et au test du colza actuel est restreinte au Nord de la France. Il est donc nécessaire de l'élargir à d'autres zones géographiques de France et surtout du Canada, qui est le 2^{ème} producteur mondial de canola/colza. D'autre part, les résultats de l'adaptation de Stics à des cultivars virtuels de printemps du Canada à partir du module blé d'hiver européen et de maïs ont présenté une bonne efficacité de simulations à l'échelle régionale (Jégo *et al.*, 2010 ; 2011). Nos objectifs sont : 1) de tester le colza d'hiver sur une base de données française étendue ; 2) d'adapter le module canola à partir de celui du colza ; 3) de vérifier la performance du ou des nouveaux cultivars de canola sur une base de données canadienne étendue afin 4) de tester à moyen terme les prédictions des émissions de N₂O par confrontation à des données de flux mesurés en continu par la technique des gradients (Pattey *et al.*, 2006). Les résultats préliminaires des trois premiers objectifs sont présentés dans cet article.

Matériel et Méthodes

L'adaptation du modèle plante au canola a été faite sous la version WinStics 6.95 puis testé sous la version ModuloStics, selon les étapes suivantes :

- 1) Construction de deux nouvelles bases de données, avec 45 unités de simulation en France issues de parcelles et 189 unités de simulation issues d'expérimentations du Canada, avec mobilisation de fonctions de pédotransfert incluant la macroporosité.
- 2) Test des performances du paramétrage du colza d'hiver en France (phénologie, production, sol).

- 3) Test ou définition de la courbe de dilution de l'azote pour le canola (Sansoulet *et al.* ; en préparation).
- 4) Paramétrage de la phénologie du canola en fonction de la bibliographie (Canola Council of Canada, 2012).
- 5) Optimisation commune ou différenciée du canola et du colza, de paramètres du fichier plante choisis selon Guillaume *et al.* (2011) puis test sur un autre jeu de données à l'aide d'OptimiStics (Wallach *et al.*, 2011).
- 6) Test sous ModuloStics sur les 234 unités de simulation du Canada et de France.

Résultats et discussion

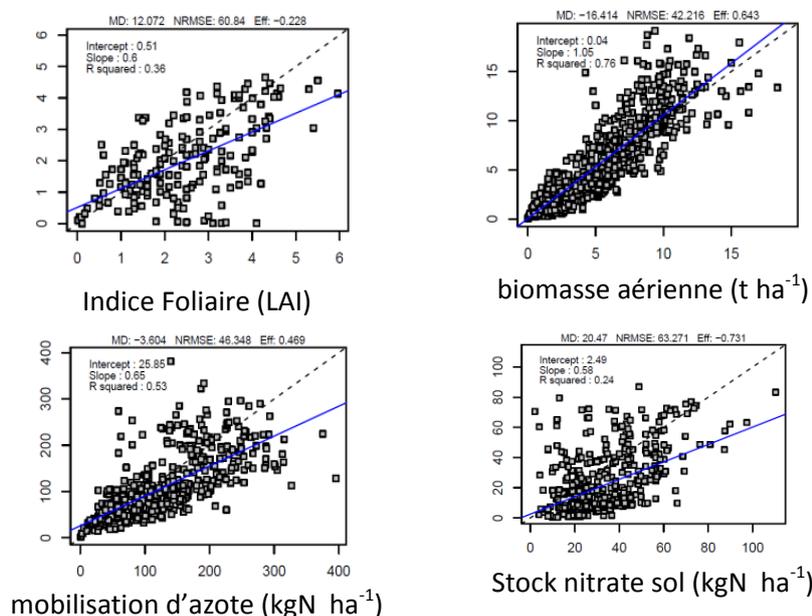
Le fichier plante initial de la version 6.95 a prédit sans biais, mais avec une certaine dispersion, la matière sèche, la quantité d'azote absorbée et le stock d'azote nitrique du sol dans les 45 unités de simulation de France (régions de Dijon, Issoudun, Surgères). Le paramétrage de Beaudoin *et al.* (2008) produit une meilleure prédiction des stades phénologiques en maintenant une efficience de prédiction équivalente pour ces trois variables, atteignant 0,78- 0,29 et 0,37 respectivement. Il a donc été retenu comme base d'adaptation pour le canola.

Pour décrire la phénologie du canola, quatre groupes variétaux ont été définis (3 pour l'ouest et 1 pour l'est du Canada). L'optimisation de 12 paramètres jugés prioritaires a révélé des difficultés, que ce soit en prenant les situations de canola seul (30 unités de simulation) ou en considérant l'association canola/colza (45 unités de simulation). Dans les graphiques de comparaison simulé/observé, le nuage de points de LAI (indice foliaire) simulé est très dispersé et, celui de matière sèche aérienne coupé en deux de part et d'autre de la bissectrice. De plus, les stocks d'azote sont très mal simulés. Cela s'explique en partie par les mauvaises prédictions de LAI et de la nitrification dans la version 6.95, régie par un seuil d'humidité unique. Sa désactivation a conduit à simuler un stress azoté qui a affecté l'optimisation, d'autant que les données initiales de NO₃ et NH₄ ont été saisies séparément dans les unités de simulation de canola.

La transposition du fichier plante canola/colza dans la version ModuloStics a permis d'obtenir des résultats plus satisfaisants (figure 1). La prédiction sans biais de la matière sèche s'explique probablement grâce à la meilleure estimation de la disponibilité en azote, via la prise en compte de la nitrification. Les prédictions de la biomasse, du LAI et du stock d'azote du sol sont néanmoins très dispersées. La sous-estimation de la quantité d'azote mobilisée pas la culture, QN_{plante}, peut être due au fait que les données observées ont été accrues de 17 % pour tenir compte des racines. Ce paramétrage pourrait être encore amélioré sous la version 6.95, compatible avec OptimiStics, en testant plusieurs pistes :

- Additionner l'azote nitrique et ammoniacal dans les données initiales et désactiver le module de nitrification.
- Étendre les bases de données de calibration avec les essais de Dejoux (France) et de Morrison (Canada).
- Changer la base de température du développement, de 0°C actuellement, alors qu'elle varie de 0,5 à 4,5°C suivant le stade du colza (Habekotté, 1996) et estimée à 5°C pour le canola (Morrison *et al.*, 1989).
- Utiliser l'option source/puits pour décrire le remplissage des grains et l'utilisation de réserves (Habekotté, 1996).

Figure 1 - Prédications (y) à l'aide de ModuloStics et observations (x) pour les 234 unités de simulation de canola et colza



Conclusions

Ces résultats préliminaires montrent que 1) l'approche générique entre colza et canola est envisageable sous réserve de trouver un compromis entre leurs bases de température ; 2) les performances sont tributaires des options et de la version, telle la nitrification ; 3) le passage à ModuloStics, dont la compatibilité avec Optimistic n'est pas encore assurée, permet un saut qualitatif important pour l'étalonnage futur du module des émissions de N₂O.

Remerciements

Cette étude a été initiée lors d'une mission financée par le programme de Coopération de l'OCDE. Les expériences sont le fruit de programmes de recherche d'Agriculture et Agro-Alimentaire Canada (AAC), de l'Inra et du Cetiom. Nous remercions les techniciens et professionnels de recherche qui ont contribué à la base de données Canola notamment, Dave Dow (Ottawa), Greg Semach (Beaverlodge), Mike Svistovski (Brandon), Larry Michielsen et Jennifer Zhuidof (Lacombe), Randall Brandt (Lethbridge), Arlen Kapiniak (Scott) d'AAC et les techniciens régionaux du Cetiom : Gilles Sauzet (Saint-Florent), Pascal Fauvin (Surgères) et Sylvie Clerget (Dijon). Enfin, merci à Elsa Coucheney, Dominique Ripoché et Samuel Buis, qui nous ont aidés à utiliser la « routine R », ModuloStics et Optimistic respectivement.

Références bibliographiques

- Beaudoin N., Makowski D., Mary B., Wallach D., Parnaudeau V., Parisseaux B., Machet J.M., Meynard J.M., 1998 - Evaluation de l'impact économique et environnemental de la mesure agri-environnementale "réduction d'intrants" au moyen de modèles agronomiques. Rapport au Ministère de l'Agriculture, Décembre 1997, 79 pages + annexes.
- Beaudoin N., Launay M., Sauboua E., Ponsardin G., Mary B., 2008 - Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyères catchment, *European Journal of Agronomy*, 29 (1), 46-57.
- Canola Council of Canada, 2012 - Chapter 2 (canola varieties) et chapter 3 (Growth stages): <http://www.canolacouncil.org>

- Guillaume S., Wallach D., Bergez J.E., Justes E., 2011 - Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model. *European Journal of Agronomy*, 35, 115-126.
- Jégo G., Pattey E., Bourgeois G., Morrison M.J., Drury C.F., Tremblay N., Tremblay G., 2010 - Calibration and performance evaluation of soybean and spring wheat cultivars using the STICS crop model in Eastern Canada. *Field Crop Research*, 117, 183-196.
- Jégo G., Pattey E., Bourgeois G., Tremblay N., Drury C.F., 2011 - Calibration and performance evaluation of a corn cultivar adapted to Eastern Canada in the STICS crop model. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 557-570.
- Jégo G., Pattey E., Liu J., 2012 - Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops. *Field Crop Research*, 131, 63-74.
- Habekotté B., 1996 - Winter Oilseed rape: analysis of yield formation and crop type design for higher yield potential. Thèse de l'Université de Wageningen, The Netherland, 156 pp.
- Metivier K.A., Pattey E., Grant R.F., 2009 - Using the Ecosys mathematical model to simulate temporal variability of nitrous oxide emissions from a fertilized agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 2370-2386.
- Morrison M.J., McVetty P.B.E., Shaykewich C.F., 1989 - The determination and verification of a baseline temperature for the growth of Westar summer rape. *Canadian Journal of Plant Science*, 69, 455-464.
- Pattey E., Edwards G., Strachan I.B., Desjardins R.L., Kaharabata S., Wagner Riddle C., 2006 - Towards standards for measuring greenhouse gas flux from agricultural fields using instrumented towers. *Canadian Journal of Soil Science*, 86, 373-400.
- Pattey E., Jégo G., Sansoulet J., Liu J., Duchesne I., Tremblay N., Beaudoin N., 2012 - Performance de STICS à prédire la productivité du maïs grain en réponse aux variations climatiques dans l'est du Canada. 1) réinitialisation à l'aide du LAI extrait de LANDSAT pour prédire des rendements spatialisés ; 2) simulation de la réponse à la fertilisation azotée. IXe Séminaire du modèle de culture Stics, Sainte-Montaine, France, 16-19 Octobre 2012.
- Roche R., 2000 - Poster colza , Séminaire STICS, 21 & 22 septembre 2000. CIRAD Montpellier.
- Sansoulet et al. (en préparation) : Determination of critical dilution curve of Nitrogen within dry matter for canola in Canada.
- Wallach D., Buis S., Lecharpentier P., Bourges J., Clastre P., Launay M., Bergez J.-E., Guerif M., Soudais J., Justes E., 2011 - A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling & Software*, 26, 386-394.

EVALUATION DES PERTES EN NITRATE DANS DIFFERENTS SYSTEMES DE CULTURE AVEC LE MODELE STICS

Carole Bécel, Nicolas Munier-Jolain, Bernard Nicolardot

INRA, UMR 1347 Agroécologie, F-21000 Dijon, France

Mots clés :

Agriculture durable, nitrate, système de culture, Stics.

Les systèmes de culture innovants visent à répondre à des critères économiques, sociaux et environnementaux pour assurer la durabilité de l'agriculture en phase avec les préoccupations actuelles de la société. La protection intégrée des cultures (PIC) entraîne des changements importants qui impliquent la modification des rotations (durée, type de culture), des itinéraires techniques (travail du sol, dates de semis, etc.), et des interventions phytosanitaires (herbicides vs. désherbage mécanique). Depuis 2000, le domaine expérimental de l'Inra de Dijon-Epoisses mène des essais systèmes en protection intégrée des cultures pour réduire l'utilisation de pesticides et plus particulièrement d'herbicides (systèmes PIC-adventices).

Le modèle Stics (version 6.95) est utilisé pour simuler 11 années d'expérimentation effectuées sur cinq systèmes de culture : un système de référence, fréquent en Bourgogne (colza/blé d'hiver/orge d'hiver), et quatre systèmes PIC-adventices où le travail du sol et les rotations sont variables mais répondent à différentes règles de décision. Les simulations des différents scénarios cultureux menés dans chaque parcelle sont validées en se basant sur les données mesurées de rendement, de biomasse des parties aériennes et de surface foliaire, ainsi que sur les dates de floraison observées et les reliquats azotés mesurés à chaque sortie d'hiver. Les sorties de Stics sont comparées entre elles au regard des bilans azotés, et plus particulièrement des pertes en nitrate.

Les résultats montrent que les systèmes PIC-adventices, en comparaison au système de référence, ont davantage de pertes cumulées en nitrate au cours des 11 années d'étude (moyenne de 88 vs. 62 kg N ha⁻¹). La concentration maximale en azote de l'eau percolante est la plus faible (20 mg N L⁻¹) dans le système où aucune application d'herbicide n'est autorisée, et la plus élevée (40 mg N L⁻¹) dans le système où la gestion des adventices est gérée par désherbage mécanique. Les pertes ne sont pas constantes au cours d'une année et sont plus ou moins importantes d'une année sur l'autre. Elles dépendent essentiellement des précipitations, des périodes de sol nu, du type de culture ainsi que des pratiques culturales. L'introduction d'une culture intermédiaire de moutarde entre une céréale d'hiver et une culture de printemps entraîne moins de pertes de nitrate à l'automne et en hiver qu'une jeune céréale d'hiver semée en octobre, d'autant plus que les semis sont tardifs en systèmes PIC. La céréale d'hiver est trop peu développée pour utiliser l'azote nitrique présent dans le sol qui est alors lixivié lors des précipitations automnales. La fréquence du travail du sol affecte aussi la lixiviation. En effet, les pertes en nitrate seront d'autant plus importantes que le travail du sol est fréquent, comme c'est le cas pour les systèmes PIC-adventices (enfouissement des semences, faux-semis, désherbage mécanique).

Si cette étude permet de cibler les scénarios, et plus précisément les associations de pratiques culturales qui limitent la lixiviation des nitrates, ces résultats doivent être toutefois réintroduits dans une analyse multicritère qui permettra d'évaluer les systèmes PIC-adventices dans un cadre global de leur durabilité sociale, économique et environnementale.

BILAN SUR LES FLUX D'AZOTE DE SCENARII D'EPANDAGES DE PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES A L'EHELLE DE LA SUCCESSION DE CULTURES

*Enguerrand Burel*¹, *Ahmed Karim Dhaouadi*^{2,3,4,5}, *Virginie Parnaudeau*^{6,7}, *Nouraya Akkal*^{6,7},
Xavier Heudelot^{4,5}, *Christine Aubry*^{6,7}, *Sabine Houot*^{2,3}

¹ Prestataire du CIRAD

² INRA, UMR 1091 EGC, F-78850 Thiverval-Grignon, France

³ AgroParisTech, UMR 1091 EGC, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ INRA, UMR 1048 SADAPT, F-75231 Paris, France

⁵ AgroParisTech, UMR 1048 SADAPT, F-75231 Paris, France

⁶ INRA, UMR 1069 SAS, F-35000 Rennes, France

⁷ Agrocampus-Ouest, UMR 1069 SAS, F-35000 Rennes, France

Mots-clés

Épandage, résidus, fertilisation, nitrate, contaminant, flux, rendement, rotation, sol

Aujourd'hui, l'actualisation des connaissances sur les pratiques d'épandage de produits résiduares organiques (PRO) est un des enjeux importants de l'agriculture. En effet la nécessité de valoriser des effluents de différentes origines pousse à améliorer nos connaissances sur leur utilisation. Dans le cadre de la directive « nitrate » 91/676/CEE du 12 décembre 1991, il est cependant imposé un certain nombre d'obligations quant à leur utilisation. Le projet Isard, pour Intensification écologique des Systèmes de production Agricole par le Recyclage des Déchets, a pour objectif d'étudier la possibilité de remplacer la fertilisation minérale par l'apport de produits résiduares organiques. Le but est de limiter l'impact environnemental (pertes de nitrate, accumulations de métaux, etc.) de ces apport tout en conservant la rentabilité de la production.

Afin d'étudier des contextes pédoclimatiques et socio-économiques contrastés, le projet Isard se déroule sur quatre territoires différents : la Plaine de Versailles, dans l'agglomération de Dakar au Sénégal, dans la région de Mahajenja à Madagascar et à la Réunion. Les UMR EGC (Grignon), SADAPT (Paris) et SAS (Rennes) de l'Inra travaillent en collaboration sur le projet pour le territoire de Versailles. Pour déterminer des pratiques optimales d'épandage, différents scénarii d'utilisation de produits résiduares organiques sont simulés avec le modèle Stics. Parmi les sorties de simulations, se retrouvent les pertes en azote, la volatilisation d'ammoniac, la lixiviation nitrique et la biomasse produite. Les résultats des scénarii seront ensuite traités par programmation linéaire pour déduire les scénarii optimaux. Les données qui seront présentées lors du séminaire correspondent à la synthèse des sorties du modèle Stics faisant état des flux d'eau et d'azote. D'autres paramètres interviendront en complément pour la phase d'optimisation : nombre de passages sur les parcelles, flux de contaminants associés aux épandages, etc. Ils ne seront pas évoqués ici.

La première étape du travail avec le modèle Stics aura été de valider son utilisation grâce à des données issues d'un essai à long terme : Qualiagro localisé sur la plaine de Versailles. Il s'agit d'un essai ayant pour objectif le suivi d'apports répétés de PRO à long terme. Douze années de mesures ont donc servi à valider le modèle. Concernant le paramétrage des résidus, 5 PRO amendants (fumier de cheval très pailleux, fumier de cheval composté, fumier de bovin, amendement du commerce à base de compost de déchets verts avec ajout de farine animale, et compost de déchets verts) ainsi que 3 PRO fertilisants (fientes de volaille, lisier deshydraté, boue séchée) ont été choisis sur leur représentativité d'utilisation (données issues d'enquêtes auprès

d'agriculteurs) sur le territoire de Versailles. Les cinétiques de minéralisation de l'azote organique de ces PRO ont été obtenues en laboratoire et ont été paramétrées dans le modèle. Les autres données de l'itinéraire technique qui ont été paramétrées dans le modèle correspondent à des valeurs déduites des enquêtes sur les plaines Versailles.

Le climat utilisé pour les simulations est basé sur une année climatique représentative des rendements potentiels obtenus, toute culture confondue, dans l'essai Qualiagro. Cette année climatique, 2006-2007, est enchaînée sur les simulations. Pour pouvoir considérer l'amplitude de variation liée au climat, deux autres années, l'une sèche et l'autre humide ont été utilisées (2000-2001 pour l'année humide et l'année 2003-2004 pour l'année sèche). Les simulations ont été effectuées sur deux types de sol : argilo-calcaire et limoneux. Ces deux sols sont contrastés et représentent la plus grande partie des sols rencontrés sur les plaines de Versailles. Le sol limoneux est un sol sans cailloux avec une teneur en argile de 15 % et avec une profondeur de sol de 120 cm. Le second sol est peu profond (60 cm) avec une teneur en argile de 23 % et avec une pierrosité de 27 %. Pour chacun de ces sols, deux niveaux d'azote organique ont été simulés pour correspondre à des niveaux d'azote organique bas ou élevés, correspondant à une absence (ou à une faible utilisation) de PRO amendants ou après utilisation régulière de PRO amendants (respectivement 0,088 et 0,17 g de Norg pour 100 g de terre fine pour le sol argilo-calcaire et 0,11 et 0,23 g de Norg pour 100 g de terre fine pour le sol limoneux). Trois successions de culture différentes ont également été simulées : une succession colza/blé/maïs/blé, une succession colza/blé/blé/orge de printemps et une succession maïs/blé/escourgeon. Chacune de ces rotations a également été simulée avec une variante incluant des cultures intermédiaires pour les longues périodes d'interculture. Pour prendre en compte les exploitations pour lesquelles les pailles servent au fourrage du bétail et/ou pour lesquelles le maïs est ensilé, deux modalités de simulation ont été testées : avec et sans export de pailles. Concernant les modalités testées pour l'apport de PRO, plusieurs niveaux d'apports, de combinaisons d'apports (PRO amendant, PRO fertilisant et fertilisation minérale) et différents fractionnements des apports ont été simulés suivant les cultures. Afin que les doses d'apport de PRO simulées restent conformes à la législation actuelle, ces apports ne dépassent pas les 170 kg d'azote total apporté par hectare. Tout d'abord des scénarii témoins avec fertilisation minérale ont été simulés pour disposer de résultats de référence à comparer avec les situations avec apports de PRO. Les bilans de la production de biomasse et des flux d'azote pour ces différents scénarii seront synthétisés et présentés :

- Bilan de la production de biomasse et des flux d'azote pour les scénarii visant à relever le niveau d'azote organique dans les sols (apports de PRO amendants et d'engrais minéral)
- Bilan de la production de biomasse et des flux d'azote dans les scénarii de substitution des engrais minéraux par des PRO fertilisants quand (i) le niveau d'azote organique du sol est bas (pas d'apport de PRO amendant), (ii) le niveau d'azote organique du sol est élevé (apport de PRO amendants et de PRO fertilisants)
- Efficacité des cultures intermédiaires piège à nitrate pour diminuer les pertes d'azote dans les successions avec apport de PRO
- Comparaison des PRO entre eux en termes de production de biomasse et de flux d'azote

L'analyse de l'ensemble des résultats permettra de conclure à la possibilité ou non de substituer les engrais minéraux par des PRO tout en maintenant une production végétale satisfaisante et sans augmentation des pertes d'azote par les agrosystèmes.

ETUDE DES RISQUES DE LIXIVIATION NITRIQUE LIES AUX EPANDAGES D'AUTOMNE AVANT SEMIS DE BLE D'HIVER : LE CAS DU FUMIER DE BOVIN ET DU FUMIER DE VOLAILLE

Enguerrand Burel¹, Fabienne Butler², Virginie Parnaudeau^{3,4}, Julie Constantin^{5,6,7}, Eric Justes^{5,6,7}

¹ Prestataire de l'ACTA et d'ARVALIS-Institut du Végétal

² ARTELIA Eau et Environnement

³ INRA, UMR 1069 SAS, F-35000 Rennes, France

⁴ Agrocampus-Ouest, UMR 1069 SAS, F-35000 Rennes, France

⁵ INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

⁶ INP, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

⁷ ENSAT, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

Mots-clés

lixiviation, nitrate, épandage, produits résiduels organiques, minéralisation

Introduction

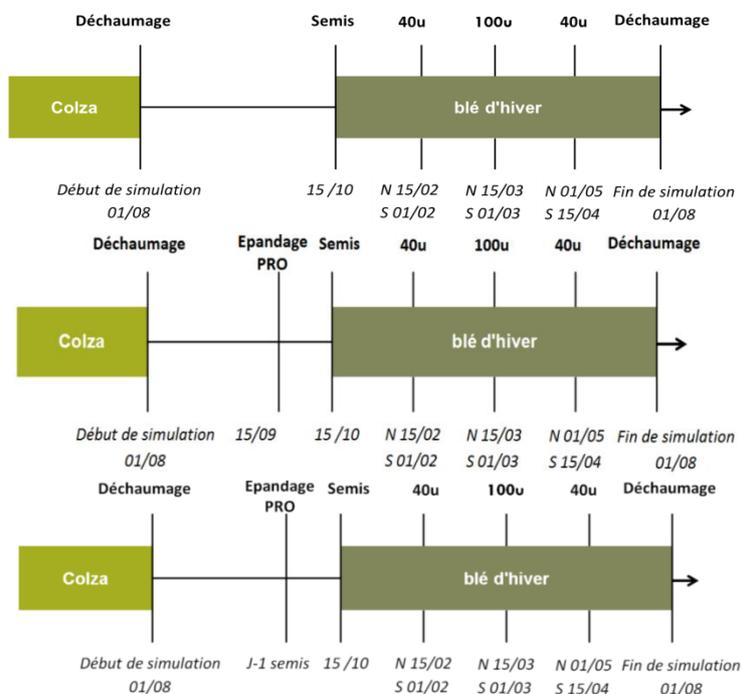
Dans le contexte du contentieux sur l'application de la Directive Nitrate entre la France et la Commission Européenne, une étude sur « l'actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés en France » a été réalisée en 2012 par ARTELIA Eau et Environnement et l'ACTA en partenariat avec l'Inra, les Instituts Techniques et les Chambres d'agriculture, à la demande des ministères chargés de l'agriculture et de l'écologie. Les objectifs de cette étude étaient (i) d'actualiser les références scientifiques et techniques du code des bonnes pratiques, (ii) d'objectiver et de déterminer les périodes optimales d'épandage pour l'ensemble des types de cultures et de fertilisants azotés, et enfin de (iii) mettre en évidence les manques de connaissance et d'expertise. Dans ce contexte, les simulations avec le modèle Stics ont servi à pallier les manques de références pour des situations à fort enjeux environnementaux. Ces simulations ont permis de répondre à plusieurs interrogations sur la possibilité d'épandages en automne. Ne sont présentés ici que les résultats sur les simulations des épandages de fumier de bovin et des épandages de fumier de volaille avant semis de blé d'hiver.

Matériels et méthodes

Cette partie de l'étude s'appuie sur le travail d'Eric Justes *et al.* (2012) pour l'étude interculture (Cf. Constantin et Justes, 2012). Les simulations ont donc été conduites sur les mêmes 24 sites climatiques répartis sur la France et les 20 années climatiques (1988-2008). L'objectif étant de simuler des situations les plus contrastées possibles par région, seuls deux types de sols différenciés sur le potentiel de minéralisation ont été conservés. L'itinéraire technique a été adapté par région d'après des données d'enquêtes nationales (Agreste, Enquête Pratiques Culturelles 2006). Les données d'initialisation du modèle pour le stock d'eau ont été fournies en simulant le précédent cultural et en reprenant les valeurs en fin de simulation. Le reliquat d'azote initial dû au précédent colza a été fixé à 30 kgN ha⁻¹ sur 90 cm grâce à des mesures fournies par les Instituts Techniques Agricoles et les Chambres d'agriculture. Au sein du modèle, deux cinétiques de minéralisation ont été paramétrées par classe de produits résiduels organiques (PRO), l'une correspondant à une minéralisation minimale et l'autre à une minéralisation maximale, permettant ainsi de couvrir une large gamme de minéralisation des PRO (figure 3, cas avec Stics). Trois types de scénarii ont été testés (figure 1) pour les simulations d'épandage de fumier de volaille et de bovin. Les quantités épandues ont été choisies d'après des pratiques d'épandage observées. Ces apports sont de 30 t ha⁻¹ (174 kgN total ha⁻¹) pour le fumier de bovin et de 8 t ha⁻¹ (168 kgN total ha⁻¹) pour le fumier de

volaille. Les résultats de simulations sont présentés pour la période du 15 septembre au 1^{er} avril qui englobe la période de drainage des sols.

Figure 1 - Schémas des scénarii. Haut : scénarii témoins. Centre : scénarii apport de fumier de volaille et de bovin. Bas : scénarii alternatifs pour l'apport de fumier de bovin. N = Nord de la France, S = Sud de la France



Résultats

Sur les témoins, la médiane du drainage par site oscille de 80 mm à 540 mm. La lixiviation médiane du nitrate correspondante varie de 15 kgN ha⁻¹ à 82 kgN ha⁻¹ pour une concentration du nitrate des eaux drainées de 103 mg.L⁻¹ à 70 mg.L⁻¹. La concentration médiane en nitrate de l'eau drainée pour tous les sites s'élève quant à elle à 76 mg.L⁻¹.

Les résultats de simulation montrent une lixiviation significativement plus importante dans le cas d'un épandage de fumier de volaille par rapport à la situation témoin (figure 2). La différence par rapport à la situation sans apport est de 37 kgN ha⁻¹ en moyenne. Dans de rares cas, correspondant à des sites à faible pluviométrie, cette différence peut cependant être faible. Le fumier de bovin n'augmente que faiblement le risque de lixiviation puisque la différence observée en moyenne avec les situations témoins est de 10 kgN ha⁻¹ et, dans plusieurs cas, l'apport de fumier limite faiblement la quantité d'azote lixivié (-3 kgN ha⁻¹). Cette différence entre les deux PRO sur les quantités d'azote lixivié est plus ou moins marquée suivant le drainage et la pluviométrie du site. Elle s'explique en partie par la quantité d'azote minéral apporté par le PRO. En effet, pour le fumier de volaille, l'apport correspond à une part d'azote minéral de 56 kgN ha⁻¹ et pour le fumier de bovin à 30 kgN ha⁻¹. Malgré tout, cette différence n'explique pas à elle seule la différence de lixiviation, la dynamique de minéralisation en étant également responsable. En effet, la courbe de minéralisation montre une phase d'organisation importante pour le fumier de bovin (figure 3) alors que pour le fumier de volaille, la minéralisation est très rapide, malgré une courte phase d'organisation. Sur les scénarii d'épandage de fumier de bovin un jour avant semis, la lixiviation est en général moins importante que dans le cas d'un apport plus précoce et même par rapport au témoin. Cette différence s'explique par la phase d'organisation nette de l'azote liée à l'apport du PRO. Quand la minéralisation nette du

résidu devient positive la culture s'est alors suffisamment développée pour absorber la part d'azote minéralisé.

Figure 2 - Boxplots de la lixiviation pour le témoin (nm) à droite, le fumier de bovin (FB) à gauche et le fumier de volaille (FV) au centre

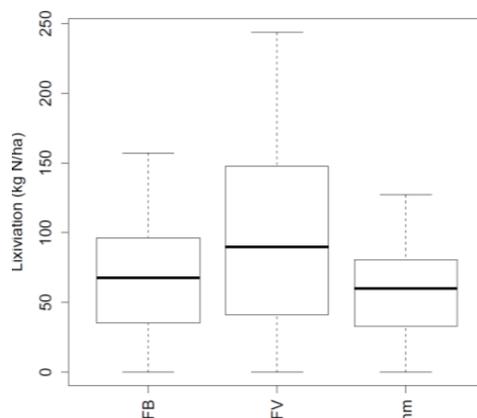
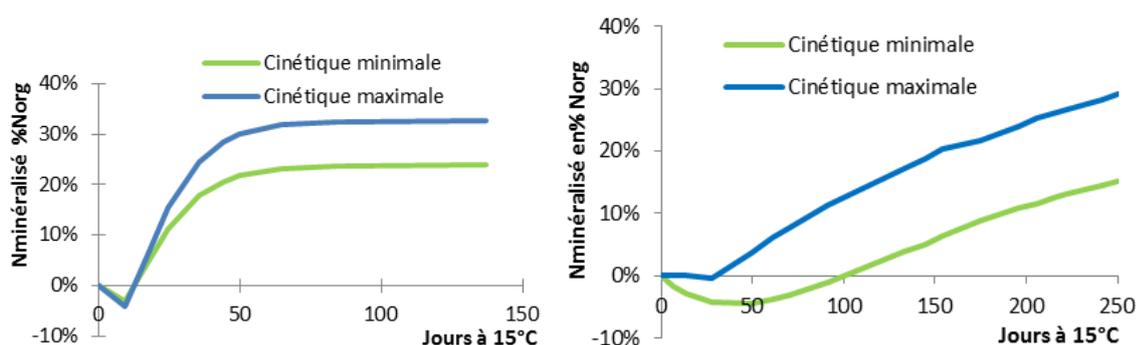


Figure 3 - Cinétiques de minéralisation pour le fumier de volaille (à gauche) et le fumier de bovin (à droite) tirées de simulations sur sol nu



Conclusion

Cette étude prospective a permis de répondre à plusieurs interrogations sur les facteurs de risque liés aux épandages en automne. Il apparaît que réaliser des épandages à l'automne sans augmenter significativement le risque de lixiviation de nitrate est possible, dans le cas de produits organiques stables ou à minéralisation faible à moyenne, tels que le fumier de bovin. Néanmoins, pour réduire le risque de lixiviation, plusieurs facteurs, autres que la nature même du PRO, sont à prendre en compte : la date d'épandage, la dose apportée, le contexte pédoclimatique. A ces facteurs peuvent également s'ajouter des facteurs non étudiés ici tels que les reliquats d'azote minéral initiaux des sols ou encore les résidus de la culture précédente. En revanche, les épandages, avant semis de blé, de produits à minéralisation forte et rapide, tels que les fumiers de volaille, comportent des risques dans toutes les situations. Il serait nécessaire d'approfondir les résultats de cette étude par une analyse de sensibilité des différentes variables sur l'impact des épandages à l'automne afin de déterminer plus précisément les limites envisageables d'un épandage d'automne pour chaque classe de PRO.

Références bibliographiques

- Constantin J., Justes E., 2012 - Simulation de l'impact des cultures intermédiaires sur la lixiviation de nitrate, le drainage et le rendement de la culture suivante dans divers pédoclimats français. *Séminaire Stics*, Sainte-Montaine, 17-19 octobre 2012.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J. Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Réchauchère O., 2012 - Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 60 p.

DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS ECOCLIMATIQUES DE LA FAISABILITE DES CULTURES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Julie Caubel¹, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri¹, Frédéric Huard¹, Marie Launay¹, Dominique Ripoche¹

¹ INRA, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

Mots-clés

Indicateurs écoclimatiques, changement climatique, faisabilité des cultures

Introduction

Les conditions agroclimatiques vont être modifiées sous l'effet du changement climatique, ce qui affectera la production alimentaire à la fois à l'échelle régionale et mondiale (Olesen *et al.*, 2011). Il est donc nécessaire de développer des outils simples de diagnostic de la faisabilité des cultures dans une région donnée. Les indicateurs agroclimatiques, variables dérivées du climat et traduisant une information écophysiological, sont des outils pertinents et souvent utilisés pour répondre à cette question (Trnka *et al.*, 2011 ; Matthews *et al.*, 2008). Mais leur calcul sur des périodes fixes (échelle du calendrier) ne tient pas compte de l'évolution de la réponse de la plante. Dans le cadre du projet ANR ORACLE, nous proposons de développer un outil de diagnostic de la faisabilité des cultures dans le contexte du changement climatique en développant une série d'indicateurs « écoclimatiques ». Les résultats pourront être utilisés par les décideurs afin d'établir des stratégies d'adaptation des agrosystèmes dans un contexte de changement climatique.

Matériels et méthodes

Les indicateurs « écoclimatiques » sont définis comme des indicateurs agroclimatiques (e.g. le risque d'échaudage) calculés pour une ou plusieurs phases phénologiques (e.g. la période de remplissage des grains), de façon à prendre en compte l'évolution de la phénologie de la plante. Ils sont reliés aux processus écophysiological qu'ils caractérisent (e.g. le remplissage des grains), de façon à pouvoir caractériser la faisabilité de la culture. Ces indicateurs peuvent être basés sur la température et les précipitations ce qui leur permet de couvrir une large gamme de questions.

Pour illustrer ce travail, nous avons étudié la faisabilité d'une culture de blé tendre d'hiver à partir de l'évolution temporelle des indicateurs proposés pour trois sites français : Toulouse, Versailles et Dijon. Les indicateurs ont été calculés à partir de données climatiques allant de 1950 à 2100 et générées par le modèle de circulation générale ARPEGE selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre médian A1B. Les données climatiques ont été régionalisées selon la méthode quantile-quantile (Terray *et al.*, 2010). Les stades phénologiques (stades levée, épi 1 cm, floraison et récolte) ont été simulés par Stics (Brisson *et al.*, 2009) à partir des mêmes données climatiques d'entrée dans le cadre du projet Climator (Brisson et Levrault, 2010). Le passé proche (PP, 1970-2000), le futur proche (FP, 2020-2050) et le futur lointain (FL, 2070-2100) ont été étudiés et des tests de différence hautement significative HSD de Tukey ont permis de caractériser leur évolution temporelle.

Résultats

Le tableau 1 présente une liste d'indicateurs écoclimatiques relatifs à la température entre la floraison et la récolte, permettant d'étudier les risques encourus par la culture de blé en un endroit donné. Par ailleurs, ils fournissent des informations indirectes relatives aux processus écophysiological ayant lieu entre la floraison et la récolte : le remplissage des grains et le développement de la plante.

Tableau 1 - Indicateurs écoclimatiques relatifs à la température, calculés entre la floraison et la récolte pour un blé d'hiver, ainsi que les processus écophysologiques caractérisés par les indicateurs

Phase phénologique	Indicateur écoclimatique	Processus écophysologique
De la floraison à la récolte	Occurrence de jours échaudants (%) Nombre de vagues d'échaudage (3 jours échaudants consécutifs) Premier/dernier jour de risque d'échaudage	Remplissage des grains
	Occurrence de jours chauds/ nuits chaudes (/ à la période de référence) (%) Occurrence de jours sous-optimaux pour le développement (%)	Développement de la plante

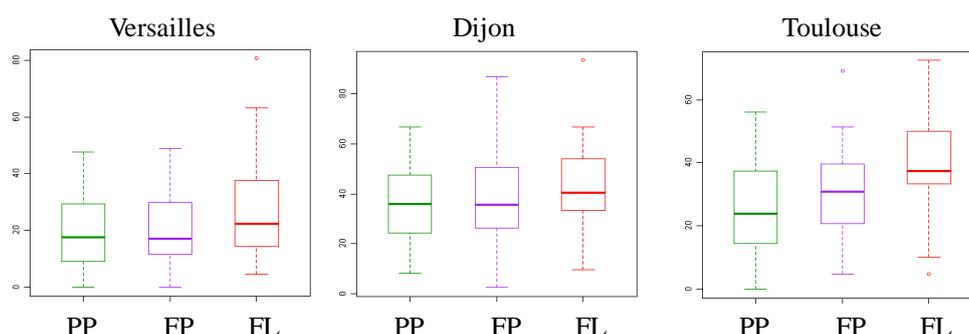
*Période de référence : climat observé entre 1970 et 2000

L'évolution de l'occurrence de jours échaudants dans le futur proche et le futur lointain est présentée à titre d'exemple (tableau 2 et figure 1). A Toulouse et à Versailles, l'occurrence de jours échaudants entre la floraison et la récolte pourrait être potentiellement plus importante dans le futur lointain, et cela de façon très significative à Toulouse. A Dijon l'évolution n'est pas significative.

Tableau 2 - Evolution de l'occurrence de jours échaudants sur blé (semé le 20 octobre)
▲ : augmentation ; = : pas significatif) à Dijon, Versailles et Toulouse – Tests HSD (Tukey) :
'***' = P<0,001 ; '**' : P<0,01 ; '*' : P<0,05

Indicateurs écoclimatiques	Versailles			Dijon			Toulouse		
	PP/F P	PP/F L	FP/F L	PP/F P	PP/F L	FP/F L	PP/F P	PP/FL	FP/FL
Occurrence de jours échaudants (%)	=	▲ (*)	=	=	=	=	=	▲ (***)	=

Figure 1 - Evolution de l'occurrence de jours échaudants (%) entre la floraison et la récolte du blé à Versailles, Dijon et Toulouse



Conclusion

Les modèles de culture (comme Stics) nous permettent actuellement de développer ce nouveau type d'indicateurs écoclimatiques. Ils fournissent des informations synthétiques sur l'évolution des agrosystèmes, en prenant en compte l'évolution de la phénologie de la plante dans un contexte de changement climatique. Ce gain de précision est très important et utile pour les décideurs (ministères, interprofession, filières, régions, etc.). Par ailleurs, ces indicateurs ne se substituent pas aux modèles mais sont un complément très intéressant pour la compréhension et la spatialisation de certains résultats obtenus par les modèles. Néanmoins, il serait intéressant par la suite de considérer

les incertitudes sur la réponse en considérant différents modèles de cultures, scénarios d'émission de gaz à effet de serre ou encore méthodes de régionalisation des données climatiques.

Références bibliographiques

- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009 - Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Éditions Quae, 304 p.
- Brisson N., Levraut F. (eds.), 2010 – Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet Climator. ADEME, 318 p.
- Matthews K. B., Rivington M., Buchan K., Miller D., Bellocchi G., 2008 - Characterising the agro-meteorological implications of climate change scenarios for land management stakeholders. *Climate Research*, 37(1), 59-75.
- Olesen, J. E., M. Trnka, Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J. and Micale, F., 2010 - Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96-112.
- Terray L., Pagé C., Déqué C. Flécher C., 2010 – L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. In : Brisson N., Levraut F. (eds.) *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet Climator*. ADEME, 318 p. pp. 19-32.
- Trnka M., Olesen J. E., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Orlandini, S., Dubrovsky, M., Hlavinka, P., Balek, J., Eckersten, H., Cloppet, E., Calanca, P., Rötter, R., Gobin, A., Vucetic, V., Nejedlik, P., Kumar, S., Lalic, B., Mestre, A., Rossi, F., Alexandrov, V., Kozyra, J., Schaap, B., Zalud, Z., 2011 - Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology*, 17(7), 2298-2318.

CALIBRATION ET EVALUATION DE CULTURES INTERMEDIAIRES DE MOUTARDE, RAY-GRASS ITALIEN ET VESCE POUR LE MODELE STICS

Julie Constantin, Eric Justes

INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

INP, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

ENSAT, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

Mots-clés

Cultures intermédiaires, azote, drainage, lixiviation, rendement

Introduction

Les cultures intermédiaires, implantées en interculture, permettent notamment de réduire les fuites d'azote nitrrique vers les écosystèmes aquatiques, pendant la période de drainage. Leur implantation est obligatoire en « zones vulnérables nitrate », avant les cultures de printemps. Si leur efficacité a déjà été démontrée à de nombreuses reprises (Tonitto *et al.*, 2006), les études sont conduites sur un nombre restreint de situations pédoclimatiques et de modalités de leur gestion. Or, pour évaluer la pertinence des mesures prises sur les cultures intermédiaires et l'éventuel nécessité d'adaptation locale, il est utile de disposer d'outils de modélisation permettant de tester une plus large gamme de situations. Cependant, il est indispensable, dans un premier temps, de calibrer ces outils puis d'évaluer leur qualité prédictive pour simuler le fonctionnement de façon précise mais aussi robuste. L'objectif de ce travail est de calibrer le modèle Stics pour 3 espèces utilisées comme cultures intermédiaires : la moutarde blanche, le ray-grass italien (RGI) et la vesce, et d'évaluer les performances du modèle dans une gamme de situations contrastées, en tenant compte du fonctionnement spécifique des espèces mais aussi de la dynamique de l'azote après incorporation des résidus de cultures intermédiaires.

Matériel et Méthodes

Dans cette étude, 16 sites expérimentaux localisés sur 11 départements français ont été sélectionnés. Ces sites présentent des températures moyennes pour la période de septembre à mars de 7,9 à 11,9°C et des précipitations mensuelles de 53 à 122 mm. Les sols ont des teneurs en argile de 5 à 33 % sur 0-30 cm, des stocks d'azote organique de 2,8 à 10,9 t.ha⁻¹ et des réserves utiles de 56 à 275 mm. Les variables « plante » mesurées sont la biomasse aérienne, l'azote dans la plante, ainsi que l'indice foliaire et la profondeur d'enracinement dans certains cas. Les quantités d'azote minéral et la teneur en eau dans le profil de sol sont également mesurées. Les situations avec des mesures fréquentes en cours de croissance ont été préférentiellement incluses dans la base de données pour la calibration (moutarde, RGI et vesce) tandis que celles pour lesquelles les mesures étaient à la destruction ont été sélectionnées pour la base de données d'évaluation (moutarde et RGI). Les données étant plus restreintes sur vesce, il n'y a pas de base d'évaluation. Quand elle était observée, la date de levée a été imposée dans la simulation. Les caractéristiques des différentes bases sont dans le tableau 1.

Le modèle Stics (version 6.9) a été calibré pour les paramètres « plante », la minéralisation des résidus étant paramétrée à partir des travaux de Justes *et al.* (2009). Pour évaluer les performances du modèle, 3 critères statistiques ont été utilisés : l'écart moyen (MD), l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE) et l'efficacité du modèle (EF). La calibration « plante » a été réalisée avec des valeurs de la bibliographie puis par optimisation de paramètres, en utilisant l'outil OptimiStics

(Wallach *et al.*, 2011). L'évaluation indépendante des nouveaux paramètres a ensuite été réalisée sur la base de données d'évaluation pour la moutarde et le RGI.

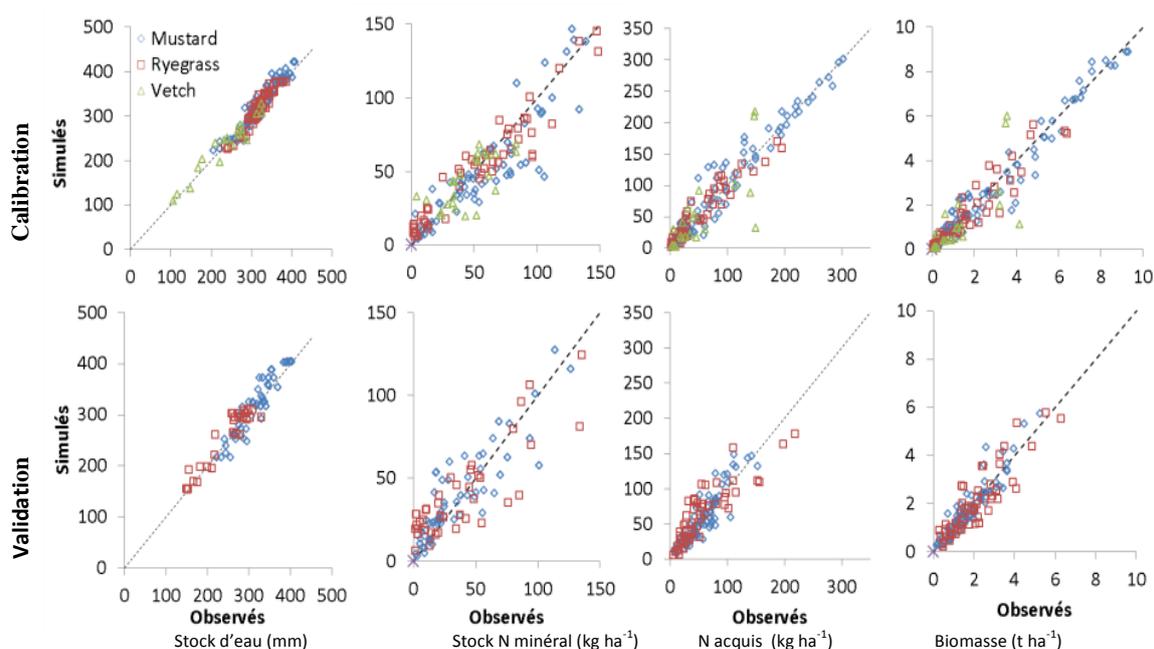
Tableau 1 - Description de la base de calibration et d'évaluation pour les 3 espèces.

Base	Espèce	Sites	Situations	Dates de semis	Dates de destruction	Irrigation (mm)	Fertilisation (kg N ha ⁻¹)	Biomasse (t.ha ⁻¹)	N absorbé et fixé (kg.ha ⁻¹)
Calibration	Moutarde	4	15	[02/8 - 10/09]	12/05	[0 - 115]	[0 - 250]	[1,0 - 9,3]	[20 - 304]
	Ray-grass	4	9	[05/8 - 01/10]	[30/3 - 24/4]	[0 - 115]	[0 - 220]	[0,3 - 6,4]	[9 - 196]
	Vesce	8	18	[18/7 - 19/9]	[10/10 - 21/2]	[0 - 85]	0	[0,2 - 4,1]	[7 - 151]
Evaluation	Moutarde	6	38	[07/8 - 19/9]	[8/10 - 25/1]	[0 - 53]	[0 - 270]	[0,3 - 5,3]	[13 - 154]
	Ray-grass	6	20	[29/7 - 17/9]	[3/12 - 2/25]	[0 - 75]	[0 - 250]	[0,6 - 6,3]	[17 - 157]

Résultats

Les comparaisons des données observées et celles simulées par le modèle Stics montrent une très bonne adéquation pour le stock d'eau du sol, que ce soit pour la base de calibration et d'évaluation, avec une faible RRMSE et sans biais (figure 1). Les efficacités du modèle sont ainsi élevées pour cette variable, de 82 à 93 % selon l'espèce. Pour la moutarde et le RGI, elles sont équivalentes sur les 2 bases, indiquant la robustesse du modèle pour les simuler. Les déviations moyennes sont faibles, de moins de 9 mm et la RRMSE ne dépasse pas 8 % (tableau 2).

Figure 1 - Comparaison simulés - observés des stocks d'eau et d'azote minéral du sol sur le profil, des biomasses et de l'azote acquis (absorbé et fixé) pour chaque espèce (bissectrice en pointillé).



Pour le stock d'azote minéral, la RRMSE est plus élevée, de l'ordre de 17 à 50 %, avec plus de dispersion sur la base de validation, liée en partie, pour le RGI, à l'absence de date de levée observée. Au contraire, le biais du modèle est faible (7 kg N ha⁻¹) et les efficacités restent élevées, de plus de 70 %, sauf pour la vesce. L'enracinement et l'indice foliaire sont correctement simulés en moyenne, mais avec une RRMSE de plus de 40 % pour l'indice foliaire, et de 18 à 27 % pour l'enracinement. Les efficacités pour ces variables sont néanmoins satisfaisantes, de 58 à 89 %.

En termes de biomasse produite et d'azote acquis (fixation incluse) par les cultures, les efficacités sur la base de calibration pour la moutarde et le RGI sont satisfaisantes, de plus de 88 %. L'évaluation indépendante des performances de simulation de la moutarde indique des efficacités équivalentes à la calibration. Pour le RGI, les efficacités sont plus faibles, bien que déjà satisfaisantes ; cela est dû à l'absence de mesure de date de levée pour certaines situations, qui augmente les erreurs de prédictions. Si les biais sont faibles pour ces différents cas, la RRMSE reste élevée (20-40 %), en partie liée aux faibles moyennes de ces variables. Pour la vesce, si l'efficacité du modèle est bien supérieure à 0 (31 et 47 %), elle reste plus faible que pour les autres espèces. L'écart entre simulés et observés est plus important pour cette espèce avec des RRMSE de 74 à 83 %. Les prévisions sont donc moins bonnes pour cette légumineuse, du fait des moindres données disponibles pour la calibration.

Tableau 2 - Valeurs des critères statistiques sur les prévisions de Stics sur les bases de calibration et d'évaluation pour chaque espèce.

Base	Espèces	Critère	Stock d'eau du sol (mm)	Stock N minéral du sol (kg.ha ⁻¹)	Indice foliaire (cm ² .cm ⁻²)	Profondeur max des racines (cm)	Biomasse (t.ha ⁻¹)	N dans la plante (kg.ha ⁻¹)
Calibration	Moutarde	MD	-2	7	0,11	7	0,09	-1
		Efficience	87%	82%	66%	58%	96%	95%
		RRMSE	5%	30%	46%	27%	20%	21%
	Ray-grass	MD	4	3	0,12	1	0,12	-1
		Efficience	82%	95%	79%	89%	88%	92%
		RRMSE	4%	17%	42%	18%	34%	30%
	Vesce	MD	4	0	-	-	0,09	3
		Efficience	93%	46%	-	-	31%	47%
		RRMSE	8%	32%	-	-	83%	74%
Evaluation	Moutarde	MD	-7	-4	-	-	0,03	-1
		Efficience	86%	70%	-	-	90%	82%
		RRMSE	6%	37%	-	-	20%	23%
	Ray-grass	MD	-9	-1	-	-	0,08	-6
		Efficience	85%	71%	-	-	77%	74%
		RRMSE	8%	50%	-	-	31%	41%

Conclusion

Le paramétrage réalisé donne des résultats satisfaisants pour la moutarde et le RGI, dans une large de conditions pédoclimatiques et techniques. Ces résultats indiquent que le modèle Stics peut être précis et robuste pour la simulation des cultures intermédiaires, malgré sa généricité. La date de levée, qui est d'une grande importance dans le cas des cultures intermédiaires qui ont des cycles de croissance courts, n'est pas encore suffisamment bien simulée dans le modèle Stics, surtout par manque de précision dans les mesures de la profondeur de semis et des teneurs en eau du sol dans le lit de semences, pour ne pas avoir besoin de la forcer dans les simulations. Le paramétrage de la vesce est acceptable mais des données plus extensives, notamment sur la fixation symbiotique, permettraient sûrement une amélioration du paramétrage ; une évaluation indépendante serait également utile.

Références bibliographiques

- Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009 - Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil*, 325, 171–185.
- Tonitto C., David M.B., Drinkwater L.E., 2006 - Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, 58–72.
- Wallach D., Buis S., Lecharpentier P., Bourges J., Clastre P., Launay M., Bergez J.-E., Guerif M., Soudais J., Justes E., 2011 - A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling and Software*, 26, 386–394.

UN PREMIER PAS VERS UN SYSTEME DE PREDICTION DU RENDEMENT EN TEMPS REEL ?

Benjamin Dumont¹, Salvador Ferrandis², Vincent Leemans¹, Bernard Bodson², Jean-Pierre Destain³, Marie-France Destain¹.

¹ULg-GxABT, Département des Sciences et Technologies de l'Environnement, 5030 Gembloux, Belgique

²ULg-GxABT, Département des Sciences Agronomiques, 5030 Gembloux, Belgique

³CRA-W, Département Agriculture et milieu naturel, 5030 Gembloux, Belgique

Mots-clés

Stics, temps réel, prédiction rendement, impact stress

L'objectif de cette recherche est le développement d'un outil capable de prédire les rendements d'une culture de blé en temps réel, au fur et à mesure que la saison avance. Pour atteindre cet objectif, nous avons développé une méthodologie qui repose sur l'adjonction des éléments suivants : (i) le modèle de culture Stics (INRA, France), (ii) un réseau de capteurs sans fil pour le suivi des variables agro-environnementales (*éKo system*, The Crossbow technologies, USA) et (iii) une base de données météorologiques.

La base de données météorologiques MDB (Meterological DataBase) est issue de la station d'Ernage qui fait partie du réseau de l'IRM (Institut Royal Météorologique Belge), et comporte des données climatiques enregistrées depuis 30 ans. Le réseau de capteurs implémentés sur le site d'essai (Gembloux, Belgique) mesure l'ensemble des données météorologiques servant d'entrée au modèle Stics, depuis la plantation jusqu'à la récolte. La station d'Ernage est située à 4 km du champ expérimental. Les informations transmises par le réseau de capteurs ont été comparées à celle de la MDB et jugées équivalentes, même si quelques différences ponctuelles peuvent apparaître principalement au niveau de la pluviométrie.

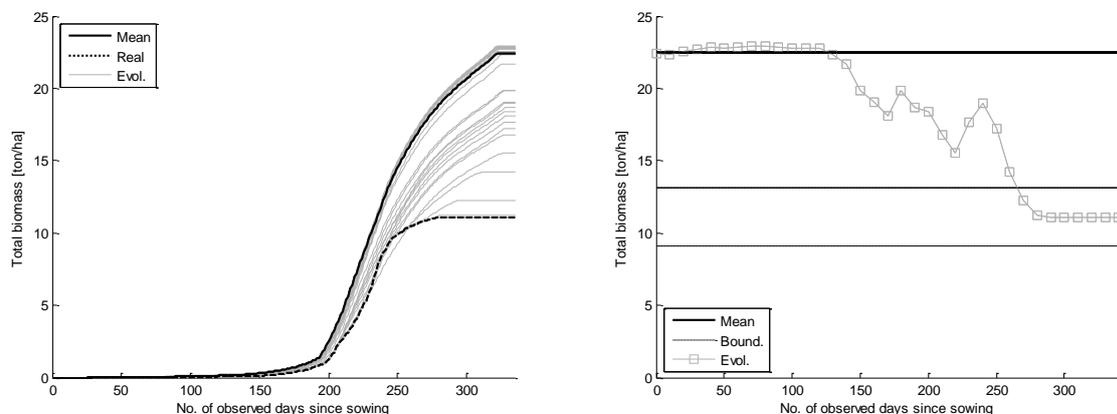
Dans un premier temps, la MDB a été utilisée pour calculer les moyennes journalières de chacune des variables météorologiques nécessaires aux simulations du modèle. Les valeurs moyennes de chaque variable (températures minimale et maximale, pression atmosphérique, vitesse du vent, intensité de la pluie et radiation solaire) sont calculées jour après jour comme la moyenne des trente données disponibles pour un jour donné. Une base de données moyennes est ainsi créée (MBC - Mean Belgian Climate) et peut se représenter sous la forme d'une matrice de données. Elle correspond à un climat qui n'induirait pas de stress au niveau de la plante. En effet, un tel climat offrirait à la plante un minimum de somme de températures chaque jour, de l'énergie solaire et surtout le minimum de pluie quotidienne limitant le stress en eau de la culture. De telles conditions peuvent être considérées comme pseudo-optimales.

Dans un deuxième temps, une "matrice-ensemble" est générée. Le point de départ est la matrice MBC. En sélectionnant un ensemble climatique réel (*p.ex.* le climat de l'année 2007-08) et en remplaçant les 10 premiers jours du MBC par les données réellement mesurées, on génère une deuxième matrice. En utilisant ainsi un taux de remplacement décadaire, on obtient la "matrice-ensemble", dont la première matrice correspond au climat moyen (MBC), la dernière matrice représente un climat purement réel et toutes les matrices intermédiaires correspondent à une combinaison de ces deux ensembles de données. Les simulations peuvent enfin être réalisées, avec l'entièreté de la matrice-ensemble comme entrée de Stics. Les simulations sont toutes menées avec les mêmes données initiales (teneur en eau et en nitrate du sol, date de semis, etc.) et en appliquant le même itinéraire technique (dates de

fertilisation fixes). Précisons également que le modèle Stics a été calibré sur une base de données de 3 saisons de culture (2008 à 2011) aux conditions climatiques particulièrement contrastées, sous différents niveaux de fumure (0 à 240 N) et pour le même cultivar de blé (*Triticum aestivum* L., cultivar Julius).

La figure 1 (graphique de gauche) montre les différentes simulations de biomasse obtenues avec comme entrée du modèle le MBC (trait noir continu), le climat réel (trait noir en pointillés) et les situations intermédiaires (trait gris). Le graphique de droite de la figure 1 représente les valeurs finales de biomasse simulée, en fonction du nombre de jours de climat réel observé depuis le semis, avec le climat moyen en projection future. Au plus on avance dans le temps, au plus la proportion de données réellement mesurées augmente et au plus les résultats de la simulation permettent de s'approcher du rendement qui sera réellement observé. Autrement dit, sur la base de l'hypothèse d'un climat moyen en tant que climat hypothétique futur, chaque valeur du diagramme correspond au rendement potentiel que l'on peut encore espérer en fin de la saison, si les conditions climatiques sont favorables.

Figure 1 - A gauche : Simulation de la matière sèche totale au cours de la saison. Rendements obtenus avec le climat moyen seul (trait noir continu) et avec le climat réel seul (trait noir pointillé) pour l'année 2007-2008. Les représentations grises (traits gris continus) représentent toutes les combinaisons de ces deux climats (matrice-ensemble), avec un taux de remplacement de 10 jours. A droite : Rendement final en biomasse totale simulé à concurrence du nombre de jours de climat réel connu (trait gris '-□-'). Rendements obtenus avec le climat moyen seul (trait noir continu horizontal). Erreur de prédiction de 10 % autour du rendement final sur climat réel (traits en tirets noirs '-_-').

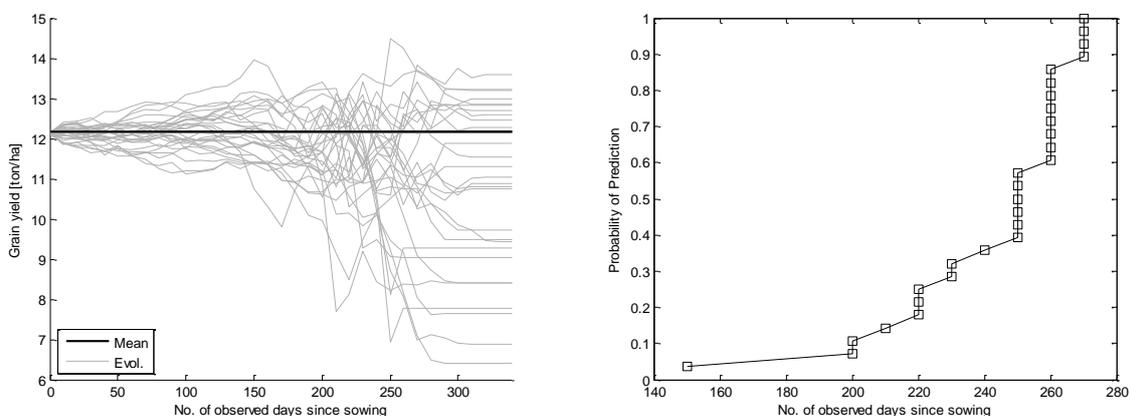


Afin de procéder à une prédiction du rendement statistiquement valable, la même méthodologie est appliquée aux trente années de la MDB, ce qui aboutit à la figure 2 (graphique de gauche). Dans un second temps, on détermine *a posteriori* et pour chaque année, la première matrice de données climatiques (combinaison particulière de climat réel et moyen) à partir de laquelle la prédiction aurait été possible. Pour ce faire, on associe au rendement final obtenu sur le climat réel (figure 1, graphique de droite) un intervalle de confiance, c'est-à-dire une erreur tolérée sur la prédiction, fixée dans ce cas à 10 % (trait en tirets noirs). Le premier jour pour lequel la prédiction est acceptable par rapport à l'erreur tolérée, et de ce fait aurait été possible, correspond au premier jour inclus dans l'intervalle de confiance. Finalement, l'information correspondant aux premiers jours pour lesquels la prédiction est possible peut être synthétisée en traçant la fonction expérimentale de densité cumulée (CDF - cumulative density function) (figure 2 - graphe de droite).

Comme on peut le voir sur la figure 2 (gauche), le MBC correspond bien à un climat pseudo-optimal,

avec une prédiction de rendement de l'ordre de 12 t ha^{-1} . Les trente années de la MDB couvrent quant à elle une gamme de rendement allant de $6,5$ à 14 t ha^{-1} .

Figure 2 - A gauche : Evolution du rendement grain pour toutes les "matrices-ensembles" et toutes les années de la base de données (traits gris). Le trait noir continu correspond à la simulation avec le climat moyen. A droite : Distribution de densité cumulée relative à la prédiction du rendement grain.



La présentation des résultats sous cette forme fournit les distributions de rendement au cours de la saison et à travers les années, ce qui nous permet (i) de mettre en évidence les périodes les plus sensibles à l'induction de stress, (ii) de quantifier instantanément les pertes de rendement dues aux conditions climatiques des 10 derniers jours en comparaison du potentiel restant à la culture et enfin (iii) de procéder à une estimation significative (CDF > 90 %) du rendement (par rapport à une erreur de $\pm 10 \%$ autour des simulations réalisées avec le climat réel pur).

Grâce à cette méthodologie, il est possible de prédire le rendement grain environ un mois avant la date de récolte. Appliquée en étude préliminaire, cette approche constitue un outil de diagnostic puissant des potentialités d'une culture sur un site donné (où le sol est déterminé et les données climatiques sont connues sur plusieurs décennies). En outre, elle a le potentiel d'être employée en temps réel, en vue d'adapter l'itinéraire technique, si nécessaire.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à la DGO-3 du SPW, pour son support financier, ainsi qu'au CRA-W, et spécialement le département 'Agriculture et milieu naturel', pour la base de données météorologiques d'Ernage, qu'elle nous a fourni.

Références bibliographiques

Dumont B., Leemans V., Ferrandis S., Vancutsem F., Bodson B., Destain J.-P., Destain M.-F. Assessing the potential to predict wheat yields supplying the future by a daily mean climatic database. *Agricultural and Forest Meteorology* (In Review).

IMPACT DES INCERTITUDES LORS DE L'ESTIMATION SPATIALISEE DES PARAMETRES SOLS DU MODELE STICS - QUESTIONS METHODOLOGIQUES

*Christine Le Bas¹, Yves Coquet^{2,3}, Marion Bardy¹, Robert Faivre⁴, Martine Guérif⁵, Florence Habets^{6,7},
Isabelle Cousin⁸*

¹ INRA, US 1106 Infosol, F-45075 Orléans, France

² INRA, UMR 1091 EGC, , BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon, France

³ AgroParisTech, UMR 1091 EGC, F-78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ INRA, UR 875 BIA, F-31326 Castanet Tolosan, France

⁵ INRA, UMR 114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

⁶ Ecole des Mines-Paristech, UMR SISYPHE, F-77305 Fontainebleau, France

⁷ Paristech, UMR SISYPHE, F-77305 Fontainebleau, France

⁸ INRA, UR 0272 USS, F-45075 Orléans, France

Mots-clés

Modélisation, estimation de paramètres, incertitudes, bases de données sols spatialisées.

Les sols sont au cœur de nombreuses problématiques environnementales en raison de leur rôle d'interface entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère. L'état de l'eau du sol, tant qualitatif que quantitatif apparaît souvent au cœur des processus mis en jeu. L'étude de ces processus a souvent lieu à des niveaux d'organisation allant de l'agrégat à la parcelle. Il en résulte le développement de modèles complexes adaptés à ces niveaux d'organisation, comme le modèle Stics. Le sol est souvent pris en compte dans ces modèles au travers notamment de modules hydrodynamiques permettant d'estimer l'évolution de la teneur en eau du sol au cours du temps.

Cependant, de nombreuses recherches s'effectuent sur des territoires plus vastes que la parcelle : de la petite région au pays, voire au continent. A ces échelles, les modèles développés pour une échelle parcellaire sont pourtant souvent utilisés. Ils ont généralement été conçus et validés sur un nombre limité de parcelles, dans un certain nombre de contextes agronomiques et environnementaux. A l'échelle régionale, on peut se trouver dans des contextes différents de ceux pour lesquels les modèles ont été validés. De plus, si, à l'échelle locale on peut assez facilement obtenir des mesures précises des données en entrée du modèle ou ajuster ses paramètres, cela est beaucoup plus difficile à l'échelle régionale (Faivre *et al.*, 2004). Il est souvent nécessaire d'estimer les paramètres notamment lorsque l'on souhaite utiliser des bases de données sols spatialisées.

Ces bases de données sont conçues dans un objectif de connaissance de la répartition dans l'espace des principaux types de sol et de la variabilité spatiale d'un certain nombre de leurs propriétés. Elles reposent sur l'identification sur le terrain de zones considérées comme homogènes soit en termes de facteurs de formation des sols (Unités Typologiques de Sol (UTS)), soit en termes de répartition des sols dans le paysage (Unités Cartographiques de Sol (UCS)). Les UCS représentent les objets qui sont délimitables géographiquement à l'échelle de la carte. Elles sont constituées de une à plusieurs UTS. Les UTS sont constituées par la superposition verticale d'horizons dont on qualifie la variabilité spatiale de l'épaisseur et d'un certain nombre de leurs propriétés.

Fournir les paramètres sols pour la modélisation sur de vastes territoires pose plusieurs problèmes notamment liés à la nature des données sols disponibles. En effet, les paramètres des modèles sont rarement disponibles dans les bases de données sols spatialisées et les propriétés des sols décrites dans ces bases le sont souvent sous forme qualitative. C'est notamment le cas de la Base de Données

Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, seule base de données couvrant l'ensemble du territoire français métropolitain.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs projets ont nécessité la fourniture de paramètres sols spatialisés pour le modèle Stics sur de vastes territoires (Donet *et al.*, 2001 ; Durandeu *et al.*, 2009 ; Godard *et al.*, 2008 ; Ledoux *et al.*, 2007 ; Lefebvre, 2010). Pour suivre les évolutions du modèle Stics et pour répondre aux besoins des différents projets, les méthodes mises au point pour fournir ces paramètres sont devenues de plus en plus complexes, depuis le développement de fonctions ou de règles de pédotransfert (Le Bas *et al.*, 2005) vers l'utilisation de méthodes complexes utilisant un modèle plus mécaniste et une inversion de Stics (Lefebvre, 2010). Les unités de simulation sont souvent issues d'un croisement géographique entre les données pédologiques, climatiques, d'occupation du sol et des systèmes de culture. La localisation des UTS ne se faisant qu'au travers des UCS, ces croisements restent assez complexes notamment pour établir une relation éventuelle entre sols et occupations du sol. Certaines propriétés du sol sont d'ailleurs dépendantes de cette relation comme par exemple le taux de carbone organique des sols.

Malgré les essais de paramétrage mentionnés plus haut, plusieurs questions se posent. Comment évaluer les paramétrages obtenus à partir de bases de données spatialisées ? Quelle est leur fiabilité ? L'estimation des paramètres est-elle dépendante des objectifs de la modélisation ? Quels sont les impacts des incertitudes d'estimation sur les sorties du modèle ? Comment prendre en compte la variabilité interne aux UTS ? Comment améliorer l'estimation des paramètres dépendants d'autres facteurs que le sol ? Pour répondre à ces questions, une thèse vient de débiter. Elle s'appuie essentiellement sur les travaux réalisés précédemment à partir de la Base de données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000 pour l'estimation des paramètres sols de Stics. Ses objectifs sont 1) de déterminer, par une analyse de sensibilité, à quels paramètres sols Stics est le plus sensible, puis 2) de réaliser une analyse d'incertitudes sur ces paramètres et 3) de définir une méthodologie d'évaluation du paramétrage spatialisé. Un certain nombre de questions et de besoins ont déjà été formalisés. Sur quelles variables de sortie évaluer le paramétrage ? Quelles sont les données disponibles ? Quel est l'impact des conditions initiales et des pratiques ? Le séminaire Stics sera l'occasion d'échanger sur ces aspects avec la communauté des utilisateurs de Stics et peut-être d'établir des collaborations autour de données ou de méthodes utilisables pour ce travail.

Références bibliographiques

- Durandeu S., Gabrielle B., Godard C., Jayet P.-A., Le Bas C., 2009 - Coupling biophysical and micro-economic models to assess the effect of mitigation measures on greenhouse gas emissions from agriculture. *Climatic Change*, 98, 51-73
- 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.
- Faivre R., Leenhardt D., Voltz M., Benoit M., Papy F., Dedieu G., Wallach D., 2004 - Spatialising crop models. *Agronomie*, 24, 205-217.
- Godard C., Roger-Estrade J., Jayet P.-A., Brisson N., Le Bas C., 2008 - Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU. *Agricultural Systems*, 97(1-2), 68-82.
- Le Bas C., King D., Daroussin J., Arrouays D., 2005 - Estimation des paramètres sols pour STICS à partir d'une base de données spatialisées sur les sols à petite échelle. Séminaire Stics, Carry-le-Rouet, France.
- Ledoux E., Gomez E., Monget J.M., Viavattene C., Viennot P., Ducharne A., Benoit M., Mignolet C., Schott C., Mary B., 2007 - Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Science of The Total Environment*, 375 (1-3), 33-47
- Lefebvre M.-P., 2010 - Spatialisation de modèles de fonctionnement hydromécanique des sols appliquée à la prévision des risques de tassement à l'échelle de la France. Thèse de l'Université d'Orléans. Inra, UR Sols et Infosol, Orléans, France. 294 pages.

CALIBRATION ET EVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MODELE STICS POUR SIMULER LA CROISSANCE ET LA VALEUR NUTRITIVE DE LA FLEOLE DES PRES

Guillaume Jégo¹, Gilles Bélanger¹, Gaëtan F. Tremblay¹, Qi Jing¹, Elizabeth Pattey²

¹ Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 Boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3, Canada

² Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherches de l'Est sur les céréales et les oléagineux, 960 Avenue Carling, Ottawa, ON, K1A 0C6, Canada

Mots-clés

Stics, fléole des prés, biomasse, valeur nutritive, NDF, IVTD

La fléole des prés (*Phleum pratense* L.) est une plante fourragère pérenne tolérante au froid qui est largement cultivée en Amérique du Nord et en Europe du Nord. Le modèle Catimo (CANadian Timothy MOdel; Bonesmo et Bélanger, 2002a, 2002b) a été initialement développé pour simuler la croissance primaire de la fléole des prés. Il a été validé avec des jeux de données indépendants provenant de différents sites au Canada et en Scandinavie. Il a été par la suite amélioré pour simuler la dynamique de l'indice de récolte (Jing *et al.*, 2011) ainsi que le regain après la première coupe (Jing *et al.*, 2012). Alors que la croissance de la plante et l'évolution des variables de valeur nutritive sont bien décrites par le modèle, le compartiment sol n'est que sommairement décrit et les processus simulés ne permettent pas d'estimer les bilans hydrique et azoté. D'un autre côté, diverses études ont montré que le modèle Stics (Brisson *et al.*, 1998, 2002) pouvait être utilisé pour estimer de façon relativement fiable les bilans hydrique et azoté d'un ou plusieurs cycles de cultures (ex. Beaudoin *et al.*, 2008 ; Jégo *et al.*, 2012). Il a par ailleurs, déjà été calibré pour simuler la croissance de certaines plantes fourragères telles que les graminées (Rugé *et al.*, 2001, Rugé *et al.*, 2006), la luzerne et la fétuque (Juin *et al.*, 2004 ; Rugé *et al.*, 2009) mais il ne permet pas d'estimer la valeur nutritive de la biomasse produite (hormis sa teneur en azote).

L'objectif de cette étude était donc de calibrer et d'évaluer la performance du modèle Stics à simuler la croissance et la valeur nutritive de la fléole des prés. Ce travail s'est concentré sur des cycles de croissance annuels incluant la croissance primaire et le regain avec une réinitialisation du modèle au 1 avril de chaque année. Des simulations pluriannuelles sans réinitialisation nécessiteraient au préalable une vérification du module snowMAUS (Trnka *et al.*, 2010) qui permettrait de simuler les effets des conditions hivernales. L'objectif à plus long terme est de bénéficier d'un outil de modélisation permettant de simuler l'impact des variations pédoclimatiques et des pratiques agricoles sur le compromis entre la quantité et la qualité de la biomasse produite de même que sur le bilan environnemental (eau et azote) d'un cycle de culture de fléole des prés.

Un total de 24 jeux de données (champ × année × traitement azoté) répartis sur 3 sites à travers le Canada a été utilisé. Ces données incluent des mesures d'indice de surface foliaire (LAI), de biomasse aérienne, de concentrations en azote et en parois cellulaires (NDF), de digestibilité des parois cellulaires et de la matière sèche de la biomasse. Deux des 24 jeux de données ont été utilisés pour calibrer le modèle : un pour l'Est du Canada (cultivar Champ) et un pour l'Ouest du Canada (cultivar Climax). La première étape a consisté à calibrer les paramètres contrôlant la dynamique de croissance de la surface foliaire et de la biomasse en utilisant le paramétrage de la fétuque comme valeurs initiales. Au total, 13 paramètres ont été calibrés : les paramètres contrôlant la phénologie et la dynamique du LAI (*stamflax* et *stlevamf*), la montée à graine

(*stlevdrp*), les vitesses d'installation et de disparition du LAI (*dlaimaxbrut*, *durvief*), le lien entre le LAI et la biomasse de feuilles (*slamin*, *slamax*), et, les paramètres d'efficacité de conversion du rayonnement intercepté concernant les températures seuils (*teopt*, *teoptbis* et *temax*) et les valeurs maximales aux différents stades (*efcroijuv*, *efcroiveg* et *efcroirepro*). Après calibration, les prédictions de biomasse et de LAI des 2 jeux de données de calibration étaient très bonnes avec quasiment aucun biais (< 2 %), une NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) faible (< 10 %) et une efficacité élevée (> 0,9). La seconde étape de la calibration a consisté à calibrer les équations utilisées dans Catimo afin de calculer les indices de valeur nutritive à partir des variables de sorties de Stics (biomasses des feuilles, des tiges et de la partie aérienne totale). Après calibration de ces équations, les valeurs nutritives simulées étaient également très proches des mesures utilisées pour la calibration (NRMSE < 5 %).

Les 22 autres jeux de données ont été utilisés pour évaluer la performance du modèle après calibration. Pour la croissance primaire, les prédictions de LAI, de biomasse, de concentration en azote et des autres paramètres de valeur nutritive de la plante étaient globalement bonnes avec une NRMSE inférieure à 30 % en moyenne pour toutes les variables. Cependant, les prédictions étaient un peu moins bonnes pour le cultivar Climax (NRMSE légèrement supérieures à 30 %) que pour le cultivar Champ. Pour le regain, les prédictions étaient globalement moins bonnes. Le LAI et la biomasse produite tendaient à être surestimés par le modèle. En conséquence, les NRMSE étaient généralement élevées (> 30 %) et les efficacités souvent faibles, voire négatives dans certains cas. Cependant, les valeurs absolues de RMSE étaient relativement proches de celles obtenues pour la croissance primaire, avec par exemple pour la biomasse, des valeurs de RMSE de 66,5 g m⁻² pour la croissance primaire et 73,5 g m⁻² pour le regain. Les valeurs élevées de NRMSE et les faibles efficacités proviennent principalement du fait que les biomasses produites sont beaucoup plus faibles lors du regain (50 à 200 g m⁻²) que lors de la croissance primaire (600 à 900 g m⁻²). L'erreur de prédiction du modèle pour la biomasse étant de l'ordre de 70 g m⁻², la performance relative du modèle s'est donc avérée être meilleure pour la croissance primaire que pour le regain. Cependant une partie de ces erreurs de prédictions proviennent également probablement du fait que les paramètres contrôlant la gestion des réserves de la plante n'ont pas été calibrés. La prochaine étape de ce travail consiste à évaluer, et si besoin, à calibrer le module snowMAUS afin de pouvoir correctement prédire les conditions hivernales (épaisseur de neige, température et humidité du sol). Ceci permettra d'effectuer des simulations pluriannuelles et d'évaluer les bilans agronomiques et environnementaux complets d'une culture de fléole des prés.

Références bibliographiques

- Beaudoin N., Launay M., Sauboua E., Ponsardin G., Mary B., 2008 - Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the on farm database of Bruyères catchment. *European Journal of Agronomy* 29, 46-57.
- Bonesmo H., Bélanger G., 2002a - Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: I. Growth and nitrogen. *Agronomy Journal*, 94, 337-345.
- Bonesmo H., Bélanger G., 2002b - Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: II. Digestibility and fiber. *Agronomy Journal*, 94, 345-350.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002 - STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22, 69-92.

- Jégo G., Sánchez-Pérez J.M., Justes E., 2012 - Predicting soil water and mineral nitrogen contents with the STICS model for estimating nitrate leaching under agricultural fields. *Agricultural Water Management*, 107, 54-65.
- Jing Q., Bélanger G., Baron V., Bonesmo H., 2011 - Modeling the biomass and harvest index dynamics of timothy. *Agronomy Journal*, 103, 1397–1404.
- Jing Q., Bélanger G., Baron V., Bonesmo H., Virkajärvi P., Young D., 2012 - Regrowth simulation of the perennial grass timothy. *Ecological Modelling*, 232, 64-77.
- Juin S., Brisson N., Clastre P., Grand P., 2004 - Impact of global warming on the growing cycles of three forage systems in upland areas of southeastern France. *Agronomie*, 24, 327-337.
- Ruget F.; Delecolle R.; Le Bas C, Duru M., Bonneville N., Rabaud V., Donet I., Perarnaud V., Paniagua S., 2001 - L'estimation régionale des productions fourragères, In : Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision, Malezieux, E.; Trebil, G.; Jaeger, M., ed., 263-282.
- Ruget F., Novak S., Granger S., 2006 - Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée, *Fourrages*, 186, 241-256
- Ruget F., Satger S., Volaire F., Lelièvre F., 2009 - Modeling tiller density, growth, and yield of Mediterranean perennial grasslands with STICS. *Crop Science*, 49, 2379-2385.
- Trnka M., Kocmánková E., Balek J., Eitzinger J., Ruget F., Formayer H., Hlavinka P., Schaumberger A., Horáková V., Možný M., Žalud Z., 2010 - Simple snow cover model for agrometeorological applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1115-1127.

FAISABILITE ET PERTINENCE DE L'ESTIMATION PAR STICS DES EMISSIONS D'AZOTE REACTIF DE LA CULTURE DE TOMATE DE CONTRE-SAISON AU BENIN DANS LE CADRE ACV

Aurélie Perrin, Claudine Basset-Mens

CIRAD, UPR Hortsys, 34398 Montpellier Cedex 5, France

Mots-clés :

Azote réactif, analyse du cycle de vie, variabilité, sensibilité, incertitude

Contexte

L'analyse du cycle de vie (ACV) d'un hectare de tomate de contre-saison cultivée au Bénin, effectuée à partir des données collectées sur 13 parcelles pendant la saison 2011/2012 montre que les émissions d'azote réactif liées à l'application d'engrais (Perrin *et al.*, 2012a) contribuent significativement à l'impact environnemental de ces systèmes. Cependant, les méthodes d'estimation des émissions d'azote réactif actuellement disponibles dans le cadre ACV ne permettent pas de prendre en compte les interactions entre sol, climat et pratiques agricoles, particulièrement dans un contexte pauvre en données et en méthodes adaptées comme celui des systèmes de culture horticoles sous climat tropical. L'estimation des émissions d'azote réactif à l'aide de modèles est une voie de recherche privilégiée pour l'amélioration de la fiabilité des résultats d'ACV et la prise en compte de leur incertitude.

Sélection de la solution de modélisation

L'objectif assigné au modèle est le suivant : estimer les émissions d'azote réactif des systèmes de culture de tomate. Pour cela, Stics offre une solution de modélisation répondant aux principaux critères de sélection. Notamment, il permet de prendre en compte les spécificités des systèmes étudiés : culture de la tomate, avec des intrants azotés et des pratiques d'irrigation journalières. D'autre part, la prise en compte des stress hydrique et azoté par Stics permet d'intégrer les principaux facteurs limitants de la culture. Enfin, le couplage avec les modules Volt'Air (Génermont et Cellier, 1997) et NOE (Hénault *et al.*, 2005) permet d'intégrer à un pas de temps journalier les pertes par voie gazeuse en complément des dynamiques de mise à disposition, de mobilisation de l'azote et de lixiviation.

Simulation du rendement moyen et des variations entre parcelles

On observe une relation linéaire entre les rendements simulés et les rendements observés ($r=0,97$). Néanmoins, l'indice de concordance ($i=0,52$) calculé selon Willmott (1981) souligne l'importance du biais ($1,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) correspondant à une sous-estimation des rendements. On observe que l'erreur est principalement causée par 2 à 3 individus présentant des différences importantes ($\text{RMSE} \gg \text{MAE}$). En décomposant l'erreur selon Kobayashi et Salam (2000), on observe que la moitié de l'erreur est liée à la variance, ce qui identifie l'effet du stress comme probable source d'erreur. Une analyse des stress montre une surestimation des stress trophiques liée à un trop grand nombre de fruits initiés et, de manière moins importante, une sous-estimation des stress azotés. Le paramétrage du nombre de fruits initiés est la principale piste d'amélioration du modèle identifiée à ce stade de l'analyse.

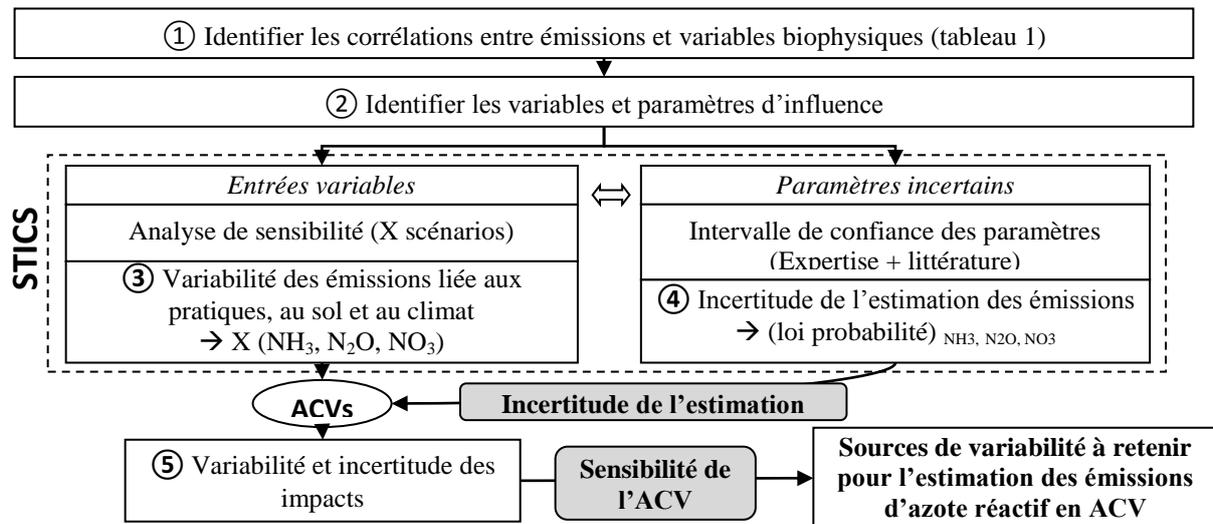
Perspectives : Analyse de sensibilité des émissions d'azote réactif aux facteurs d'influence identifiés dans la littérature

La démarche proposée en figure 1 a pour objectif d'apporter des éléments de discussion concernant les sources de variabilité à prendre en compte dans le raffinement des méthodes d'estimation des émissions d'azote réactif dans le cadre de l'ACV. Elle nécessite d'abord d'identifier les principaux facteurs influençant les émissions en réponse à la diversité de sol, de climat et des pratiques agricoles sur la base de la bibliographie (tableau 1). L'étape 2 consiste à identifier, à partir de la liste des facteurs d'influence et de leur expression dans les systèmes étudiés (12 parcelles réelles), les variables d'entrée pour lesquelles une variation des sorties du modèle est attendue. Cette variabilité sera explorée à l'aide de scénarios principalement caractérisés par le type de sol, les doses d'azote et les pratiques d'irrigation qui affectent largement les émissions d'azote réactif (en gras dans le tableau 1). L'étape 3 permettra de déterminer un vecteur d'émission (NH_3 , N_2O , NO_3) par scénario. L'étape 2 permet aussi d'identifier les paramètres clefs pour lesquels on ne dispose pas de données mesurées. Parmi ces paramètres, le potentiel de dénitrification et les conditions d'humidité initiales à la plantation sont identifiés comme principales source d'incertitude (en italique dans le tableau 1). L'étape 4 permet de quantifier le niveau d'incertitude liée au manque de données pour cette application du modèle Stics. Enfin, l'étape 5 permet de tester la sensibilité des impacts environnementaux aux variations des émissions et à l'incertitude liée à leur estimation, par le biais de simulation de Monte Carlo sur la base des lois de distribution estimées à l'aide du modèle Stics (étape 4). Cette étape permet d'écarter les facteurs dont la variabilité est inférieure à la sensibilité de l'outil ACV (ou l'incertitude supérieure à la sensibilité de l'ACV).

Tableau 1 - Facteurs influençant la variation des émissions azotées au champ (cf. Perrin *et al.*, 2012b)

Facteurs influents		Emissions Nr concernées	
Caractéristiques des systèmes	Paramètres/variables		
Sol	Type de sol		
	- Taux d'infiltration	NH_3 , NO_3	
	- pH, CEC	NH_3 , N_2O , NO_3	
	- Taux calcaire, argile	NH_3	
	- Température du sol	NH_3 , N_2O	
	- Taux de MO	NO_3	
Disponibilité en azote et en carbone du sol	- N_{org} , $[\text{NH}_4]_{\text{ini}}$, $[\text{NO}_3]_{\text{ini}}$ - <i>Potentiel de dénitrification</i>	N_2O , NO_3 N_2O	
Humidité	- Capacité au champ, flétrissement permanent, $[\text{H}_2\text{O}]_{\text{ini}}$	N_2O , NO_3	
Climat	Pluviométrie	- Pression de vapeur saturante	NH_3 , NO_3
	Température, vent	- ETP, Température de l'air	NH_3
	Radiation globale	- Albédo, LAI	NH_3 , NO_3
Pratiques	Teneur en azote engrais	- $[\text{NH}_4]$, $[\text{NO}_3]$	NH_3 , N_2O , NO_3
	Dynamiques minéralisation	- MO , N_{org} , $[\text{NH}_4]$, $[\text{NO}_3]$	N_2O , NO_3
	Date et dose de fertilisation	- $[\text{NH}_4]$, $[\text{NO}_3]$	N_2O , NO_3
	Méthode d'incorporation	- $[\text{NH}_4]$, $[\text{NO}_3]$	NH_3
	Date et dose d'irrigation	- WFPS, drainage	NH_3 , N_2O , NO_3
	Méthode d'irrigation	- WFPS, drainage, ruissellement	NH_3 , N_2O , NO_3
	Structure végétation	- LAI, drainage, ruissellement	NH_3 , NO_3
	Gestion des résidus	- N_{org} , $[\text{NO}_3]$	NO_3
Azote absorbé	- $[\text{NO}_3]$	N_2O , NO_3	

Figure 1 - Approche conceptuelle pour identifier les sources de variabilité des émissions à intégrer dans l'ACV pour mieux discriminer l'impact environnemental des systèmes de culture horticoles tropicaux



Références bibliographiques

- Génermont S., Cellier P., 1997 - A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, (1-4):145-167.
- Hénault C., Bizouard F., Laville P., Gabrielle B., Nicoullaud B., Germon J.-C., Cellier P., 2005 - Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology*, 11, 115-127.
- Kobayashi K., Salam M.U., 2000 - Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, 92(2), 345-352.
- Perrin A., Basset-Mens C., Yehouessi W., Huat J., Gabrielle B., Malezieux E., 2012a - Agronomical analysis of Life-Cycle Assessment (LCA) variability for different horticultural cropping systems at regional scale. The 12th Congress of the European Society for Agronomy, Helsinki, Finland, 20-24 August 2012. University of Helsinki, Department of Agricultural Sciences publication series.
- Perrin A., Basset-Mens C., Gabrielle B., 2012b - Life cycle assessment of horticultural cropping systems: a review focusing on systems variability and the estimation of field emissions. *Under review*.
- Willmott C., 1981 - On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.

SIMULATION PROSPECTIVE DU DRAINAGE ET DES RENDEMENTS DES PRAIRIES IRRIGUEES A L'ECHELLE DE L'AQUIFERE DE LA CRAU

Rémi Lecerf, André Chanzy, **Albert Olioso**, Rachid Hadria, Françoise Ruget, Patrice Lecharpentier

INRA, UMR 1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

Mots-clés

Stics, prairies irriguées, drainage, production agricole, modélisation, spatialisation, changements climatiques, Crau, MultiSimLib

L'alimentation en eau de l'aquifère de la plaine de la Crau (Bouches-du-Rhône) dépend des pratiques d'irrigation par submersion servant à cultiver des prairies depuis le XVII^e siècle. Aujourd'hui, la nappe de la Crau constitue la principale ressource en eau sur le secteur mais des changements dans les pratiques agricoles, notamment sous l'influence des changements climatiques et l'abandon progressif des prairies irriguées au profit de l'urbanisation, pourraient modifier le fonctionnement de la nappe et la disponibilité en eau. Modéliser le fonctionnement des prairies irriguées est crucial afin de quantifier l'apport de l'irrigation pour la nappe de la Crau mais également pour effectuer une étude prospective sur le devenir de la nappe dans les 30 prochaines années en fonction de l'évolution de l'agriculture et du climat.

Pour ce faire, nous avons développé un simulateur du fonctionnement des prairies irriguées de la Crau en se basant sur le modèle de culture Stics (Brisson *et al.*, 2009) et l'outil de multisimulation MultiSimLib (Buis *et al.*, 2011). L'ensemble des parcelles est représenté, ce qui pose le problème de fournir les pratiques culturales et les informations sur les caractéristiques du sol pour chacune d'elles. En nous basant sur des informations de terrain, nous avons élaboré des modèles spécifiques pour chacune des informations nécessaires (Mordant de Massiac *et al.*, 2011). Les pratiques agricoles des différentes parcelles (irrigation, dates de coupes et fertilisation) sont modélisées en fonction de la variabilité climatique (pluviométrie), de la taille des parcelles, et du décret établissant l'AOC foin de Crau qui définit les techniques et la « forme » des calendriers utilisés (e.g. tour d'eau). Des enquêtes auprès d'un échantillon d'exploitants agricoles ont été réalisées pour calibrer et valider la modélisation des itinéraires techniques. Les propriétés des sols sont modélisées à partir des informations (sondages) ayant servi à établir la carte pédologique et de l'âge des prairies (l'épaisseur du sol dépendant des limons apportés par l'eau d'irrigation). De nouveaux sondages ont été réalisés pour valider la modélisation. *In fine*, le fonctionnement des prairies irriguées est simulé, fournissant une estimation spatialisée, avec un grain parcellaire, de l'évapotranspiration, du flux de drainage et des rendements. Les informations sur la production ont été recueillies dans certaines exploitations pour valider les simulations.

Une idée de la représentativité des itinéraires techniques et des sols simulés est présentée sur les figures 1 et 2 pour une ou deux exploitations de référence. Les itinéraires techniques et les sols modélisés y sont comparés aux itinéraires techniques enregistrés par les agriculteurs et aux profils de sol acquis par sondages sur le terrain. La première figure montre une bonne description des périodes auxquelles les coupes ont été effectuées. La seconde figure montre que les principaux sols ont été identifiés, avec cependant une surreprésentation des sols hydromorphes et des sols les moins profonds (des parcelles mises en prairie récemment ont des profondeurs sous-estimées en raison d'une installation sur des parcelles de verger qui étaient également irriguées par irrigation gravitaire autrefois, ce qui n'a pas été pris en compte dans la modélisation des sols).

Figure 1 - confrontation des dates de coupe observées et simulées en fonction des précipitations sur deux exploitations pour l'année 2008.

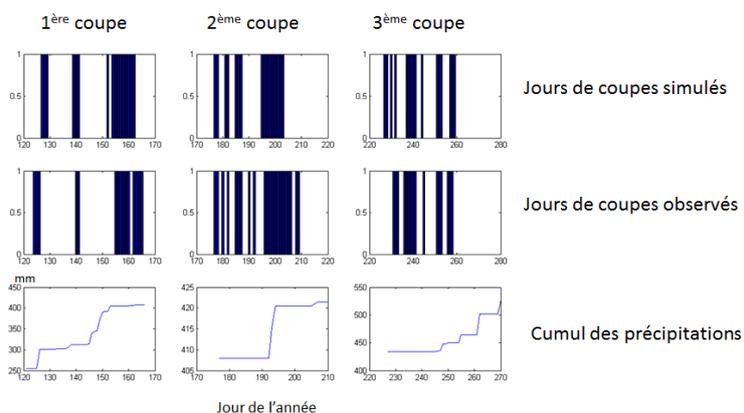
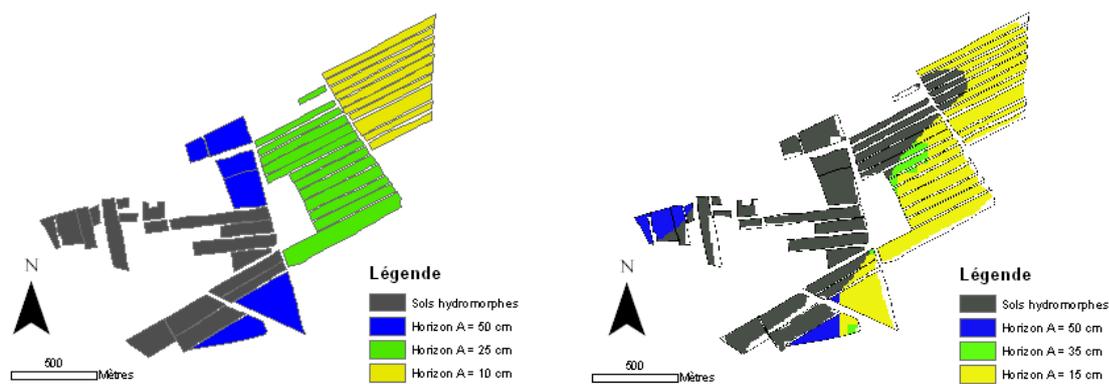
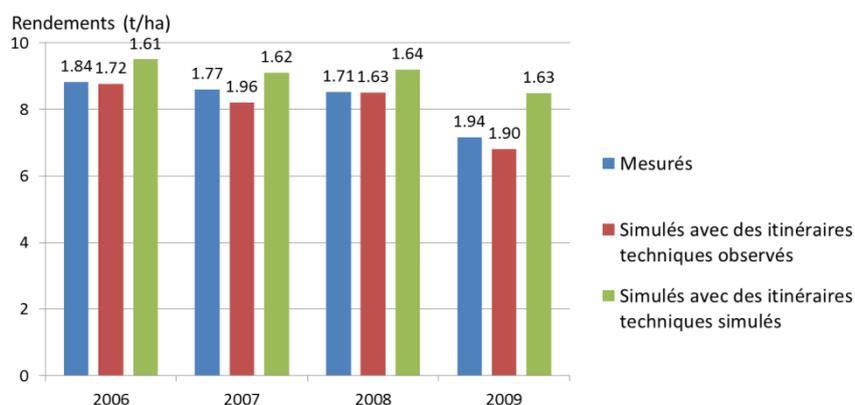


Figure 2 - à gauche : carte des sols définie suivant l'enquête de terrain sur une exploitation ; à droite : extrait de la carte des sols élaborée (modélisée) sur la plaine de la Crau pour faire fonctionner Stics.



Les simulations de rendement par le modèle Stics ont été évaluées à l'échelle des exploitations de référence en comparant les simulations de rendement aux observations (figure 3). Les rendements simulés avec des itinéraires techniques et des informations sur les sols collectés à l'échelle de l'exploitation sont bien conformes aux niveaux observés de rendement et à leur évolution. Par contre, les rendements simulés avec des itinéraires techniques et des sols simulés sont surestimés, ce qui s'explique essentiellement par la surreprésentation des sols hydromorphes à l'échelle de l'exploitation (figure 2), ces sols favorisant des rendements élevés.

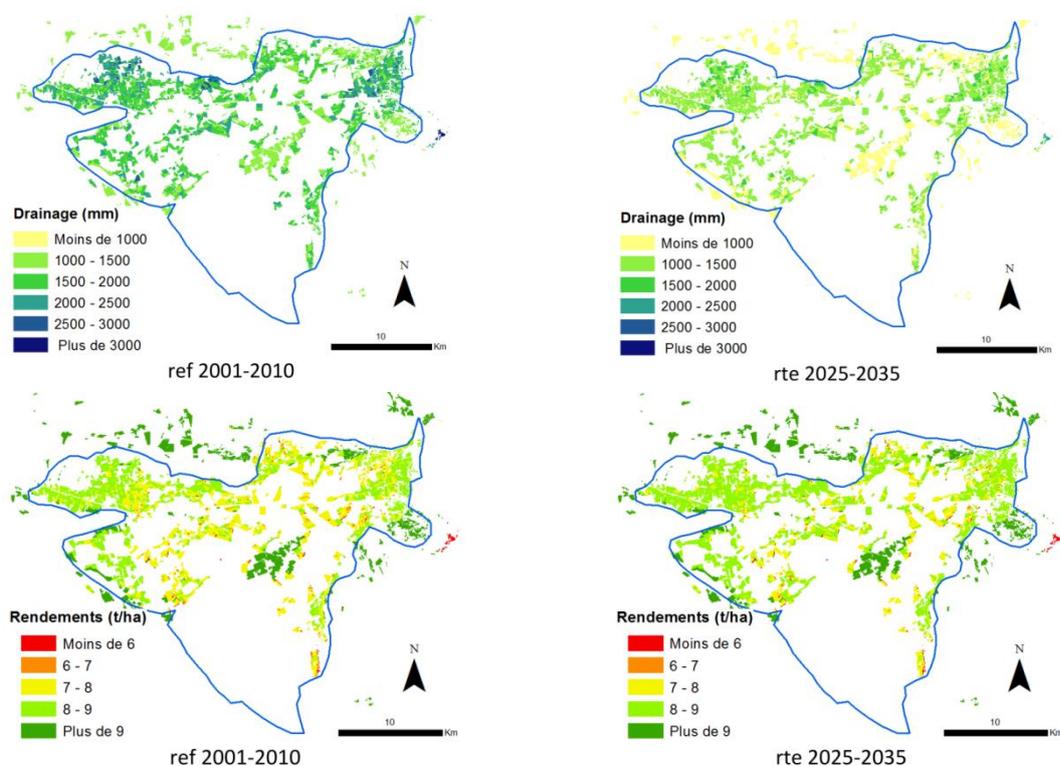
Figure 3 - Comparaison entre les rendements observés à l'échelle d'une exploitation (moyennes sur 30 parcelles, les écart-types sont donnés au-dessus), les rendements simulés avec les itinéraires techniques et les sols observés sur l'exploitation, et les rendements simulés avec les itinéraires techniques et les sols simulés.



Après avoir évalué le simulateur à l'échelle des exploitations de référence, nous avons réalisé des simulations de l'évolution du fonctionnement des prairies irriguées sur l'ensemble de la Crau en comparant la période future 2025-2035 à la situation actuelle (2001-2010). Les données météorologiques utilisées correspondent aux simulations réalisées par Météo-France au moyen du modèle Arpège-Climat suivant le scénario A1b du GIEC après régionalisation au niveau de la Crau. La procédure utilisée pour obtenir ces données est strictement la même que celle qui a été utilisée lors du projet Climator (Brisson et Levraut, 2010). Une simulation considérant une baisse des apports d'eau par irrigation de 30 % a été effectuée en supposant que la baisse de la ressource en eau se traduisait par un espacement des tours d'eau. Les résultats présentés sur la figure 4 montrent une baisse du drainage proportionnelle à la diminution des apports d'eau, de l'ordre de 30 %, avec une structure spatiale non modifiée. Les rendements ont, quant à eux, tendance à augmenter légèrement. Dans le scénario futur, les précipitations augmentent largement au printemps, ce qui peut compenser l'espacement des tours d'eau et la diminution des quantités d'eau irriguées. En conjonction avec l'augmentation des températures, la modification du régime pluvial contribue à l'augmentation des rendements.

Les résultats montrent que, dans le cas analysé, l'évolution de la production de foin de Crau (en quantité), dépend relativement peu des modifications de la ressource hydrique. Par contre, la recharge de la nappe qui dépend directement du drainage des prairies irriguées pourrait être fortement affectée.

Figure 4 - évolution des rendements moyen et du drainage annuel moyen entre 2001-2010 et 2025-2035 en considérant le scénario A1b et une diminution des apports en eau de 30 % (à gauche, moyenne sur les années de référence 2001-2010 ; à droite, moyenne sur les simulations prospectives effectuées sur les années 2025-2035)



Remerciements

Ces travaux ont été réalisés avec des contributions des projets Astuce & Tic (FUI, PACA), SIRRIMED (FP7) et SICMED-Crau (programme MISTRAL – INSU). Ils ont été rendus possibles grâce aux contributions des acteurs locaux, en particulier MM Didier Tronc (Comité du foin de Crau et responsable d'exploitation), Louis Arlot (Association des Arrosants de la Crau), François Charron (Domaine du Merle, SupAgro Montpellier) et Jean Jarrige (responsable d'exploitation).

Références bibliographiques

- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009 - Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions QUAE, ISBN 978-2-7592-0169-3. 297 pages.
- Brisson N., Levrault F. (eds.), 2010 - : Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME, 336 p.
- Buis S., Wallach D., Guillaume S., Varella H., Lecharpentier P., Launay M., Guerif M., Bergez J.E., Justes E., 2011 - The STICS crop model and associated software for analysis, parameterization and evaluation. In: L.R. AHUJA, L. MA (Eds), *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. Advances in Agricultural Systems Modeling 2*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, 395-426.
- de Mordant de Massiac J.-C., Trolard F., Bourrié G. (Coord.), 2011 - Anticipation Sécurisée des Territoires Urbanisés, des Campagnes et de leur Environnement fondée sur les nouvelles Technologies de l'Information et des Communications (Astuce & Tic). Rapport final. Inra, Avignon, France. 1450 pages.

TEST DU MODELE STICS POUR LA SIMULATION D'UNE CULTURE PERENNE, CAS DE *MISCANTHUS X GIGANTEUS* : ATOUTS ET LIMITES DU MODELE ET PROPOSITIONS D'AMELIORATION

Loïc Strullu¹, Nicolas Beaudoin¹, Marie-Hélène Jeuffroy², Bruno Mary¹

¹ INRA, US 1158 Agro-Impact, F-02000 Barenton-Bugny, France

² INRA, UMR 211 Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon, France

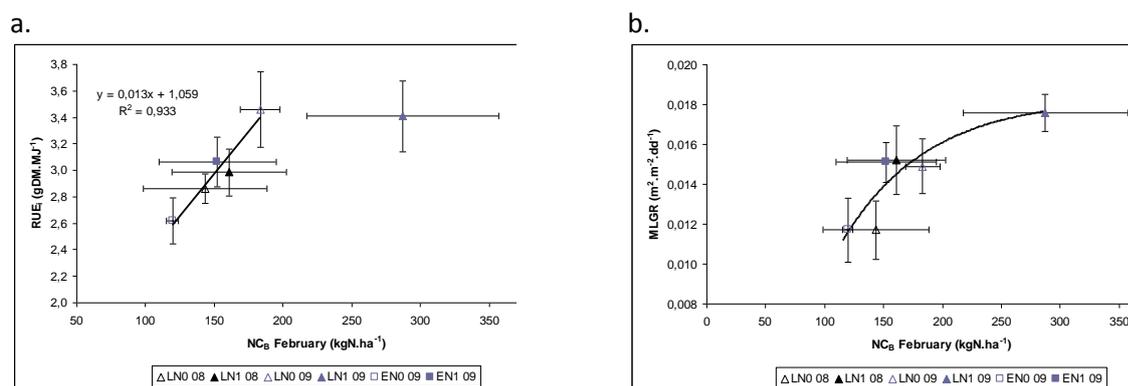
Mots-clés :

Miscanthus, cultures pérennes, réserves azotées

Introduction

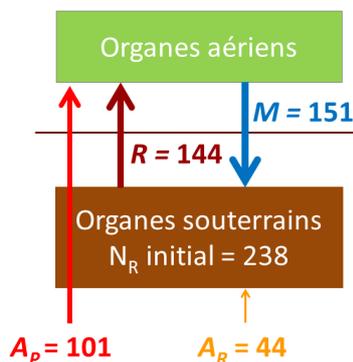
Miscanthus x giganteus est une graminée pérenne à rhizomes à métabolisme du carbone en C4. La phase d'installation de la culture dure de 3 à 5 ans en fonction du contexte pédoclimatique, la production de biomasse aérienne augmente d'année en année jusqu'à atteindre un état d'équilibre qui se maintient pendant 15 à 20 ans. Nous avons réalisé un suivi d'une culture de *M. giganteus* sur 2 années avec 2 traitements azotés (0 ou 120 kgN ha⁻¹) croisés avec 2 dates de coupe (précoce en octobre ou tardive en février) et avons suivi l'évolution de la production de biomasse, du développement du LAI (indice foliaire) et de la teneur en carbone et en azote des différents organes (tiges, feuilles, rhizomes et racines). Nous avons montré que la production de biomasse par la culture est dépendante de l'état des réserves azotées des rhizomes *via* leur effet sur l'efficacité d'utilisation des rayonnements (RUE) et la vitesse de mise en place du LAI de la culture lors de sa phase de croissance maximale (figure 1a,1b ; Strullu *et al.*, soumis).

Figure 1 - Relation entre a) l'efficacité d'utilisation des rayonnements (RUE), b) la vitesse maximale de mise en place de l'indice foliaire, et la quantité d'azote présente dans les rhizomes avant la repousse.



Nous avons également mis en évidence l'importance des flux de remobilisation d'azote qui interviennent dans la plante au printemps (R = pendant le redémarrage de la culture) et en automne (M = durant la sénescence des organes aériens) (figure 2).

Figure 2 - Flux d'azote en kg ha^{-1} dans une culture de *Miscanthus x giganteus* au cours d'un cycle de culture en coupe tardive. R = remobilisation au printemps, A_p = azote absorbé alloué aux organes aériens, A_R = azote absorbé alloué aux organes souterrains, M = remobilisation en automne/hiver, N_R = quantité d'azote présente dans les organes souterrains de réserve au démarrage de la culture.

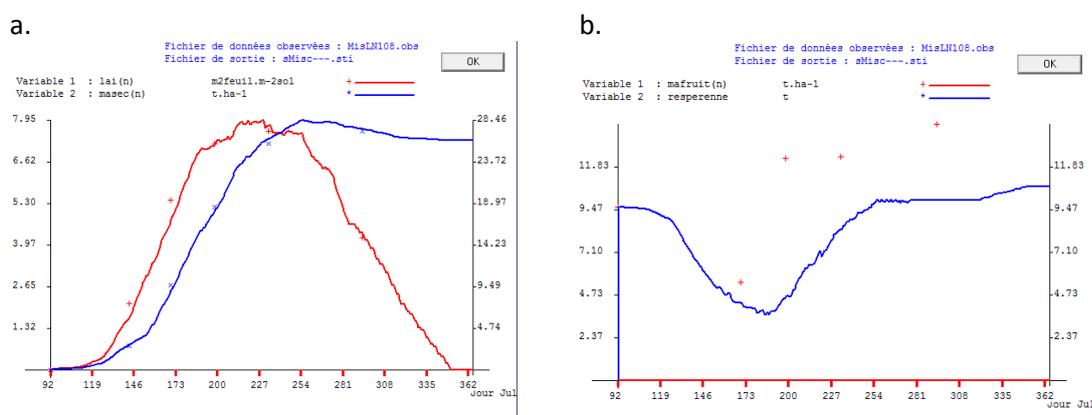


Comme observé dans d'autres plantes pérennes ou pluriannuelles, ces flux de remobilisation sont fonction de la quantité d'azote présent dans les organes sources (Ourry *et al.*, 1994 ; Strullu *et al.*, 2011). L'objectif est de concevoir un module de stockage-remobilisation des réserves azotées, qui représente ce processus pour *M. giganteus* et puisse fonctionner pour d'autres cultures pérennes (luzerne, vigne, fétuque) voire bisannuelles (betterave, colza). L'enjeu étant de simuler la production de biomasse inter-annuelle de manière dynamique, ainsi que le bilan environnemental à long terme, notamment en ce qui concerne le bilan azoté de la culture.

Schéma conceptuel, atouts et limites du modèle actuel (6.9)

Pour simuler un cycle annuel, nous avons considéré *M. giganteus* comme une culture à croissance déterminée, sans grain. Nous avons créé un fichier plante à partir du fichier existant pour le maïs en adaptant les paramètres écophysologiques. Les organes récoltés sont les tiges et feuilles associées. La variable RESPERENNE correspond à la biomasse des rhizomes. Nous sommes parvenus à obtenir une bonne simulation de la production de la biomasse aérienne par la culture, de l'évolution de l'indice foliaire et de la dynamique de RESPERENNE (figure 3a et 3b).

Figure 3 : Résultats d'une simulation annuelle avec Stics 6.9 a) biomasse aérienne et LAI b) RESPERENNE



Cependant, certaines limites du modèle sont ressorties rapidement lors de cette phase de test :

1. Remobilisation de RESPERENNE :

- Nous pourrions modifier le paramètre RESPLMAX (0,66 \rightarrow 1,80) dans la version ModuloStics. RESPERENNE sera alors limité à 27 t ha^{-1} au lieu de 10 t ha^{-1} actuellement.

- La remobilisation des réserves carbonées est trop importante lors du redémarrage de la culture, car il n'y a pas de prise en compte de la respiration associée aux coûts de la remobilisation de l'azote (cf. Avice *et al.*, 1996). Le coût de la remobilisation de l'azote chez *M. giganteus* reste cependant à déterminer.
 - Lors d'un stress azoté, le modèle simule une remobilisation des réserves carbonées qui n'a pas été observée lors des expérimentations.
2. Remobilisation des réserves azotées de la culture :
- L'absence de compartimentation de QNPLANTE empêche de simuler la mise en réserve de l'azote par la culture et donc l'évolution des réserves azotées à long terme.
 - Lors du redémarrage de la culture, les réserves en azote de la culture (QNPLANTE0) sont prioritairement utilisées par rapport aux autres sources d'azote (azote minéral et/ou fertilisant) alors que la remobilisation et l'absorption d'azote sont concomitantes.

Conclusions et propositions pour une amélioration du modèle

L'évolution des réserves azotées devra être prise en compte pour simuler la dynamique d'installation et de production de biomasse par une culture de *Miscanthus x giganteus* via son effet sur la cinétique de croissance (effet sur les stades et la vitesse de développement du LAI) et sur la production de biomasse par la culture (effet sur la RUE) (figure 1). Il sera nécessaire de compartimenter les réserves azotées de la plante et de faire une distinction entre l'azote structural et les réserves proprement dites avant de pouvoir simuler les flux de remobilisation.

Nous proposons de mettre en place un groupe de travail sur les cultures pérennes pour faire évoluer le modèle et permettre une représentation plus réaliste de la pérennité et du développement de ces cultures, grâce à la prise en compte des réserves azotées des organes de stockage.

Remerciements

Ces recherches sont financées dans le cadre du projet Futurol.

Références bibliographiques

- Avice J.C., Ourry A., Lemaire G., Boucaud J., 1996 - Nitrogen and Carbon flows estimated by ¹⁵N and ¹³C pulse-chase labeling during regrowth of Alfalfa. *Plant Physiology*, 112, 281-290.
- Ourry A., Kim T.H., Boucaud J., 1994 - Nitrogen reserve mobilization during regrowth of *Medicago sativa* L. relationships between availability and regrowth yield. *Plant Physiology*, 105, 831-837.
- Strullu L., Cadoux S., Preudhomme M., Jeuffroy M-H., Beaudoin N., 2011 - Biomass production and nitrogen accumulation and remobilisation by *Miscanthus x giganteus* as influenced by nitrogen stocks in belowground organs. *Field Crops Research*, 121(3), 381-391
- Strullu L., Beaudoin N., Jeuffroy M-H., soumis. Influence of belowground nitrogen stocks on light interception and conversion of *Miscanthus x giganteus*. *European Journal of Agronomy*.

REVISION ET EVALUATION DU MODULE DE FERTILISATION AUTOMATIQUE DE STICS EN VUE DE SIMULER DES SCENARIOS DE GESTION DE L'AZOTE

Marie-Laure Berthommé, Bruno Mary, Nicolas Pugeaux, Beaudoin Nicolas

INRA, US 1158 Agro-Impact, F-02000 Barenton-Bugny, France

Mots-clés

Fertilisation, azote, Stics, paramétrage, évaluation de modèle

1. Contexte et objectifs

En région d'agriculture intensive, réduire les fuites d'azote réactif dans l'environnement nécessite un calcul du bilan azoté ajusté au contexte parcellaire. Dans le cadre du projet européen Sun, « Sustainable Use of Nitrogen », des scénarios de gestion de l'azote et de pratiques agricoles doivent être testés à l'échelle du bassin hydrologique. Plusieurs de ces scénarios intègrent un raisonnement de la fertilisation azotée, et leur modélisation a suggéré une évaluation du module de fertilisation automatique de Stics (Brisson *et al.*, 2009). Ce document est axé sur les modifications et les résultats d'étude de sensibilité aux paramètres du module de fertilisation azotée automatique de Stics.

2. Matériels et méthodes

Données

Les données utilisées dans cette étude sont issues du bassin versant de Bruyères (Aisne) suivi depuis 1990 (Beaudoin *et al.*, 2005). Les agriculteurs y appliquent les conseils de fertilisation azotée qui leur sont fournis grâce à l'outil d'aide à la décision Azobil (actuellement Azofert® ; Meynard *et al.*, 1997). Le module de fertilisation automatique de Stics a été revu puis évalué à partir de 24 situations : 4 années climatiques x 6 cultures (betterave, blé tendre, escourgeon, colza, orge de printemps et pois). Deux années climatiques sont combinées à des doses fortes d'azote tandis que les deux autres sont associées à des doses plus faibles.

Fonctionnement du module et modifications apportées

Le module actuel calcule les doses d'azote à apporter (ANIT) selon la formule suivante :

$$ANIT = \frac{QNPLMAX - QNPLANTE}{EFFN}$$

où : *QNPLMAX* est la quantité d'azote maximale absorbable par la culture,
QNPLANTE est la quantité d'azote dans la plante,
EFFN est l'efficacité d'absorption azotée de la culture.

Les premières simulations présentant des doses totales d'azote apportées élevées, des modifications du modèle sont mises en œuvre.

- La quantité *QNPLMAX* devient la quantité d'azote critique absorbable par la culture nommée *Dcrit* (kgN ha⁻¹) et calculée à partir de la courbe de dilution critique.
- Le paramètre *RATIOLN* peut être utilisé, non plus seulement comme une condition d'apport d'azote (tableau 1), mais aussi comme pondération dans le calcul de la dose d'azote à apporter :

$$ANIT = \frac{(RATIOLN \cdot Dcrit) - QNPLANTE}{EFFN}$$

- Pour s'affranchir de toute dose totale d'azote apportée aberrante, une dose plafond optionnelle est rajoutée dans le modèle (3 x *DOSIMXN*).

Les conditions d'apport d'engrais azoté ont été complétées (tableau 1).

Tableau 1 - Conditions d'apport azoté

Conditions conservées	Conditions modifiées
<ul style="list-style-type: none"> - L'offre du sol (<i>CUMOFFRN</i>) est inférieure à la demande de la plante (<i>DEMANDE</i>). - L'indice de nutrition azoté (<i>INN</i>) instantané est inférieur à la valeur seuil <i>RATIOLN</i>. - La dose calculée <i>ANIT</i> est inférieure ou égale à un montant maximal d'azote (<i>DOSIMXN</i>) fixé par l'utilisateur. 	<ul style="list-style-type: none"> - La pluviométrie cumulée des sept jours suivants est supérieure à un certain seuil (<i>PLNMIN</i>). - L'apport est fait durant la phase végétative (jour d'apport borné à 10 jours après la date de floraison). - L'apport total peut être éventuellement plafonné par 3 x <i>DOSIMXN</i>.

Méthode d'évaluation

Pour évaluer les modifications du module et calibrer le modèle, une étude de sensibilité aux paramètres du module de calcul de fertilisation de Stics a porté sur la dose totale d'azote apportée et les rendements (biomasse aérienne et grains/fruits). Trois facteurs sont considérés dans ce plan d'expérience (tableau 2) avec des simulations à l'échelle annuelle.

Tableau 2 - Résultats statistiques de combinaisons de facteur

Facteur	Modalités
<i>PLMIN</i>	5, 10 et 20 mm d'eau
<i>RATIOLN</i> en tant que simple condition d'apport azoté	0,60 – 0,70 – 0,80 – 0,90 et 1,00
<i>RATIOLN</i> en tant que condition d'apport et calcul de la dose d'azote	0,80 – 0,90 – 1,00 – 1,10 et 1,20
<i>DOSIMXN</i> en tant que simple condition d'apport azoté	50, 100 et 150 kgN ha ⁻¹
<i>DOSIMXN</i> en tant que condition d'apport et calcul de dose plafond	50, 60, 70, 80, 90, 100, 150 kgN ha ⁻¹

L'évaluation du module de fertilisation automatique de Stics se fait par l'utilisation des critères statistiques suivants : écart moyen, RMSE et efficacité du modèle.

3. Résultats et discussion:

Les résultats (tableau 3) montrent une forte sensibilité de la dose aux différents facteurs. Cependant, aucune combinaison ne permet de reproduire la situation observée : i) le meilleur ajustement entre la dose préconisée par Stics et celle préconisée par Azofert® ne permet pas d'atteindre des rendements suffisamment élevés ; ii) des quantités d'azote très élevées sont nécessaires à Stics pour atteindre des rendements proches de ceux observés. L'absorption de l'azote par la culture semble faible. Une large part est perdue par volatilisation, dénitrification ou inutilisée sous forme minérale ou organique. Un compromis entre ajustement de la dose d'azote et des rendements consiste à prendre un *DOSIMXN* de 60 kg ha⁻¹ impliquant une fraction comprise entre 25 et 60 kg ha⁻¹ et un apport total maximal d'azote de 180 kg ha⁻¹. Le *RATIOLN* est de 1,0, ce qui permet à la culture d'avoir un apport correspondant au montant exact de la courbe critique. Enfin, le *PLMINN* de 5 mm d'eau favorise les apports azotés (modalité la moins restrictive). On peut toutefois se demander si ce seuil de précipitations sur 7 jours permet une assimilation par la plante du total de l'azote apporté.

Le manque d'anticipation sur les besoins probables de la culture du module actuel rend le calcul de dose sensible à la simulation de la sortie de stress par le modèle. Une alternative serait d'utiliser Stics en complément d'Azofert, uniquement comme indicateur de stress et non de calcul de dose, comme la mesure de la teneur de jus de base de tige dans la méthode Jubil (Justes *et al.*, 1997).

Tableau 3 - Résultats statistiques de combinaisons de facteur

Combinaison de facteurs			Dose totale d'azote			Rendement biomasse aérienne (0% eau)			Rendement grains/fruits (0% eau)		
<i>DOSIMX</i> N	<i>RATIOL</i> N	<i>PLMIN</i> N	écart moyen (obs-sim) (kg ha ⁻¹)	RMSE (kg ha ⁻¹)	EF	écart moyen (obs-sim) t ha ⁻¹	RMS E (t ha ⁻¹)	EF	écart moyen (obs-sim) (t ha ⁻¹)	RMS E (t ha ⁻¹)	EF
Combinaison présentant la meilleure efficacité de calcul de la dose d'azote totale											
-50	1,0	5	-5,37	36,95	-0,79	2,92	5,40	2,33	2,38	3,77	2,04
Combinaison présentant la meilleure efficacité de calcul de rendement biomasse aérienne											
-100	1,0	20	-120,45	147,2 7	-27,50	2,13	4,97	1,83	2,11	3,63	1,83
Combinaison présentant la meilleure efficacité de calcul de rendement grains/fruits											
-150	-1,1	5	-267,88	289,5 8	-	1,14	5,09	1,96	1,70	3,43	1,53
Combinaison présentant le meilleur compromis											
-60	1	5	-29,04	52,00	-2,55	2,51	5,28	2,19	2,22	3,71	1,96

4. Conclusion

Les résultats préliminaires ont permis de révéler certaines différences entre les calculs des apports azotés du modèle Stics et de l'outil d'aide à la décision Azofert®. Le paramétrage en l'état du module de fertilisation automatique n'est pas encore satisfaisant pour être utilisé dans une simulation de scénarios. Dans le cadre du projet Sun, un couplage sera mis en place entre les deux outils de façon à bénéficier de la robustesse de calcul d'Azofert®.

Références bibliographiques

- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009 - Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Éditions Quae, 304 p.
- Beaudoin N., Saad J., Van Laethem C., Maucorps J., Machet J.M., Mary B., 2005 - Nitrate leaching in intensive arable agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 111, 292-310.
- Justes E., Meynard J.M., Mary B., Plenet D., 1997 - Use of nitrate concentration in stem base extract of wheat and maize crops to manage N fertilization: the JUBIL method. In: Lemaire G. (ed.), *Diagnosis of nitrogen status in crops*, Springer-Verlag, Berlin, Allemagne. p. 163-188.
- Meynard J.M., Justes E., Machet J.M., Recous S., 1997 - Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. In : Lemaire G., Nicolardot B. (eds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. INRA Editions, Paris, pp. 183-200.

ADAPTATION OF CROP MODEL STICS FOR THE FLOODED RICE (*ORYZA SATIVA*)

Kamran Irfan, Françoise Ruget, Samuel Buis, Fabienne Trolard

INRA, UMR 1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

Mots-clés

Stics-riz, Camargue, paramétrisation

Introduction

STICS has already been tested for different cereal crops in and out of France under different climatic situations. Wheat (Brisson *et al.*, 2002), maize (Brisson *et al.*, 2003), barley (Launay *et al.*, 2009) and linseed (Flénet *et al.*, 2004) are the examples of few cereal crops that has been simulated by crop model STICS. Each cereal crop has its own specific growth features and cultivars. One of the common things among these cereals is growth under aerobic conditions and main limiting factors: water and nitrogen. Rice is the only crop belonging to the cereal family that requires flooded conditions for its growth. Consequently, grain yield is generally not affected by water stress (Mouret and Hammond, 2003) and it is often cultivated without nitrogen stress (high humus content). STICS has not yet been calibrated for a crop growing in anaerobic or waterlogged conditions. This paper presents the calibration and validation of STICS for the flooded rice (*Oryza sativa*). The measurements/data for calibration and validation of the model are collected from rice crops cultivated in Camargue (France), a wet region, located at the North climatic limit for the production of rice (Mouret, 2010). The model needs to be adapted to the rice (1) to understand the effects and risks of new practices concerning straw management, (2) to estimate the effects of classic and modern crop practices like fertilization, sowing density and organic farming at large scale, (3) to estimate the necessary adaptation of rice crop for climate changes (growth of rice crop under reduced water availability and temperature variations) and (4) to complete the list of the crops of this region in order to estimate the water and nitrogen balances of the whole region (projects Sicmed and Hymex).

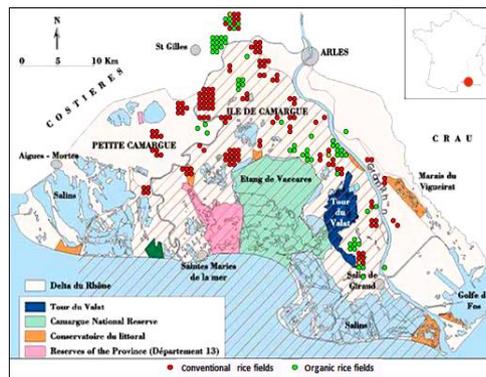
Materials and methods

For the calibration of STICS-rice, the data were obtained from the farmer's fields grown under organic and conventional managements, in the Mediterranean region *Camargue* in Southern France (figure 1). Data came from four data bases collected for different objectives and exhibit a huge variation in terms of measured variables and frequency of measurements. The growth conditions are variable e.g. (1) climatic variations (cropping year from 1984 to 2009), (2) geographic situation (fields present in all over Camargue at altitude from 0 m to 4 m), corresponding to different soil types (from saline soil to hydromorphic or clayey soils), (3) many varieties (more than 50) and (5) different cropping systems (sowing, fertilization, pest, diseases and weed treatments). There are 472 total situations available for simulation purpose for over 15 climatic years. In order to parameterize and evaluate a model for a new crop, the quality of data is very important. Since data were not collected for crop modelling purpose, co-ordinate the recorded information with the required one needs a keen analysis of the data base. To facilitate the explanation, this work consists of two parts:

- agronomic analysis of the data base to homogenize it and to attain the well representative data base for calibration
- calibration of model, fixation and optimization of parameters and validation.

The version used for this study is STICS 6.9.

Figure 1 - Rice fields under conventional and organic cropping systems in Camargue.



Results and discussion:

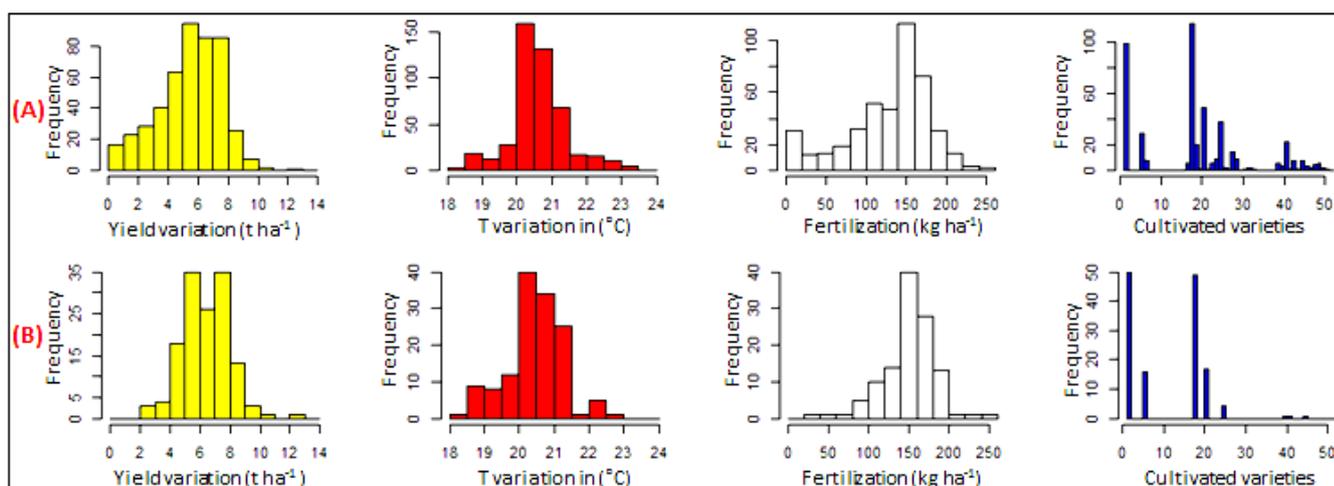
1. Analysis and filtration of the data base

From the four datasets, where the observed variables were not the same, the first step was to make it homogeneous. Then effects of climate, cultivar, soil types and management techniques on yield were observed and analyzed. In order to select the representative dataset for calibration and validation of the model, a filtration process was launched that aimed to eliminate the restriction for the rice yield (Delmotte *et al.*, 2011) and the processes which are not well understood and explained are not introduced to the model (weeds, salinity etc.). The result of filtration after analysis of the data base is shown in the table 1. Finally, 139 fields were selected for the calibration and validation of the model. We can observe the distribution of yield, temperature, fertilization (during the crop cycle) and varieties respectively in the complete data base and the filtered data base in figure 2.

Table 1 - Elimination of constraints and unpredictable processes by the crop models

Cause of filtration	criteria	Total fields	Discarded fields from four databases				Total discarded
			A	B	C	D	
Weed dry matte at harvest	>0.8 t ha ⁻¹	472	148	6	24	0	178
Salinity	>0.23	294	12	0	2	0	14
Sterility (effect of low T)	>80%	280	1	2	0	0	3
Unalike\non-repetitive varieties		277	42	0	0	0	42
Lack of info. on Panicle initiation		235	65	0	0	0	65
Error in soil OM measurement	>8	170	3	0	0	0	3
Agronomic analysis of fields		167	27	0	1	0	28
			298	8	27	0	333

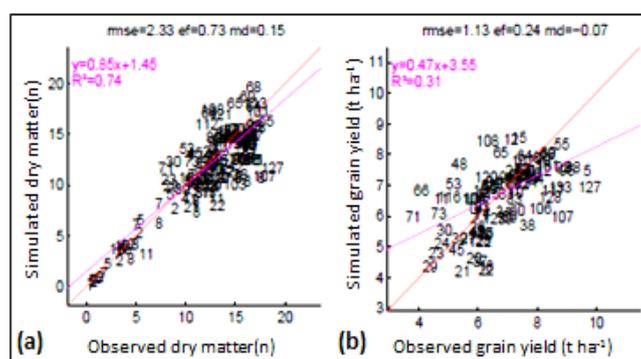
Figure 2 - Variability in the selected database for calibration and validation of the model.



2. Fixation and optimization of parameters, calibration and validation of model

The model was calibrated by an original method i.e. parameterization of most of modules of the model. The values of the parameters have been fixed first by analogy with other plant, some parameters were found in the literature and finally other principal parameters were optimized. For the simulation of rice crop, 51 STICS parameters have been found to be involved in driving the processes of the interest for the required variables. Out of them, we fixed the values of 27 parameters from literature and analogy, while 24 parameters were optimized. OptimiStics software was used for this purpose. Leaf area index, dry matter and yields are the variables selected for the optimization step. The procedure used for optimization of parameters consists of estimating all intermediate and grain yield parameters simultaneously in one step by assuming the compensatory effects in estimation of parameters. Thus the crop-specific and cultivar specific parameters were estimated at the same time. We did many optimizations by taking different combination of parameters. The simulation of dry matter and grain yield for the database of calibration is shown in the figure 3. The criteria of dry matter are better than that of grain yield due to availability of measurements at different growth stages whereas for grain yield measurements were available only at harvest stage.

Figure 3 - (a) and (b) simulation of dry matter and grain yield respectively for the data base of calibration



Conclusion

STICS model has been calibrated for the first time for rice crop. The comparison of values of initial parameters derived from wheat crop and optimized parameters for rice are shown in the table 2. Since for rice crop the poor quality of simulation is not from water and nitrogen stresses, the work is

continued to find the reasoning and to introduce to model. These results are obtained by introducing the measured phenological stages in the development module for the calculation of temperatures. Our next step is to observe the simulation by leaving a development module to simulate the phenology without forcing the observed dates. Otherwise introduction of a temperature module is one of the perspectives of this work. The presence of error in the measurements and processes of mineralization of organic matter in anaerobic soils may be the other factors causing the poor simulation.

Table 2 - Comparison of initial and optimized parameters.

Parameter	Initial value	Optimized value	unit	Module \ description
adens	-0.85	-1.267	SD	LAI \ parameter of inter-plant competition
bdens	2	36.3074	plantes m ⁻²	LAI \ min. density for leaf growth competition
efcroiveg	2.6	3.934	g MJ ⁻¹	conversion \ efficiency during vegetative growth
efcroirepro	2.8	3.8837	g MJ ⁻¹	conversion \ efficiency during grain filling
viticarbt	0.0015	0.0038494	g grain g plante ⁻¹ °C jour ⁻¹	Repartition \ thermal speed of harvest index
FINERT	0.65	0.94999	SD	mineralization \ mineralizable fraction of humus OM

Références bibliographiques

- 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 balances. II. Model validation for maize and wheat. *Agronomie*, 22, 69-92.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussiere F., Cabidoche Y. M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillere J. P., Henault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003 - An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
- Delmotte S., Tittone P., Mouret J.C., Hammond R., Lopez-Ridaura S., 2011 - On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy*, 35, 223-236.
- Flénet F., Villon P., Ruget F., 2004 - Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (*Linum usitatissimum*, L.). *Agronomie*, 24, 367-381.
- Launay M., Brisson N., Satger S., Hauggaard-Nielsen H., Corre-Hellou G., Kasynova E., Ruske R., Jensen E.S., Gooding M.J., 2009 - Exploring options for managing strategies for pea-barley intercropping using a modeling approach. *European Journal of Agronomy*, 31, 85-98.
- Mouret J.-C., Hammond R., 2003 - Elaboration de références agronomiques pour la conduite de la culture du riz (*Oryza sativa* L.) à partir de l'analyse des facteurs de variabilité du rendement. *3era. Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado*, Punta del Este, Uruguay, p. 19.
- Mouret J.C., 2010 - L'évolution des pratiques agricoles en relation avec la mise en œuvre d'une riziculture durable. *40^e anniversaire du Parc Naturel Régional de Camargue*, Arles.

CONCEPTION DE PROTOTYPES DE SYSTEMES DE CULTURE INTEGRES A BAS NIVEAUX D'INTRANTS : PREMIER RETOUR DU PROJET ANR MICMAC-DESIGN.

Hélène Raynal¹, Jean-Noël Aubertot², Jennifer Baudet¹, Jacques-Éric Bergez², Éric Casellas¹, Patrick Chabrier¹, Marie Launay³, Dominique Ripoché³, Grégory Véricel², Éric Justes²

¹INRA, UR 875 BIA, F-31326 Castanet-Tolosan, France

²INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

³INRA, US1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

Mots-Clés :

Système de culture innovant, modélisation

Introduction

Le projet MicMac-Design s'inscrit dans le contexte où la production agricole doit désormais non seulement répondre à des enjeux importants en termes de reconquête de la qualité des eaux, d'adaptation au réchauffement climatique et de réduction d'émission des gaz à effet de serre (Lois du Grenelle de l'environnement, Directive obligeant à 100% de couverture automnale des sols par des cultures d'hiver ou des Cultures Intermédiaires Piège A Nitrate en 2012, Programme Ecophyto 2018) mais aussi maintenir un bon niveau de productivité et être économiquement viable. Les concepts mobilisés dans ce projet pour concevoir de nouveaux systèmes de culture répondant à ces enjeux concernent ceux mis en avant en protection intégrée ou agriculture intégrée. Il s'agit en particulier : i) d'accroître l'efficacité de l'azote et la valorisation des ressources naturelles en termes de fixation symbiotique et de minéralisation de l'azote du sol, ii) de valoriser les régulations biologiques pour réduire les dommages des bio-agresseurs pathogènes en situation de réduction drastique des pesticides (-50 % de l'Indice de Fréquence de Traitement en 2018).

L'objectif de ce projet est de mettre au point de nouveaux systèmes de cultures durables pour atteindre les objectifs de respect de l'environnement avec des systèmes de culture innovants mais économiquement réalistes. Les leviers mobilisés pour concevoir ces systèmes de culture concernent les itinéraires techniques (en termes de pratiques agricoles innovantes pour conduire les cultures) et les rotations, en particulier avec l'introduction de cultures intermédiaires piège à nitrate (CIPAN). Les prototypes de systèmes de culture font ensuite l'objet d'une évaluation quantitative multicritère en termes d'impact sur les bilans de carbone, d'azote, d'eau et de gaz à effet de serre, sur les transferts de pesticides vers les nappes, sur leurs performances micro-économiques à l'échelle de la rotation et de l'assolement et sur leur acceptabilité dans les filières.

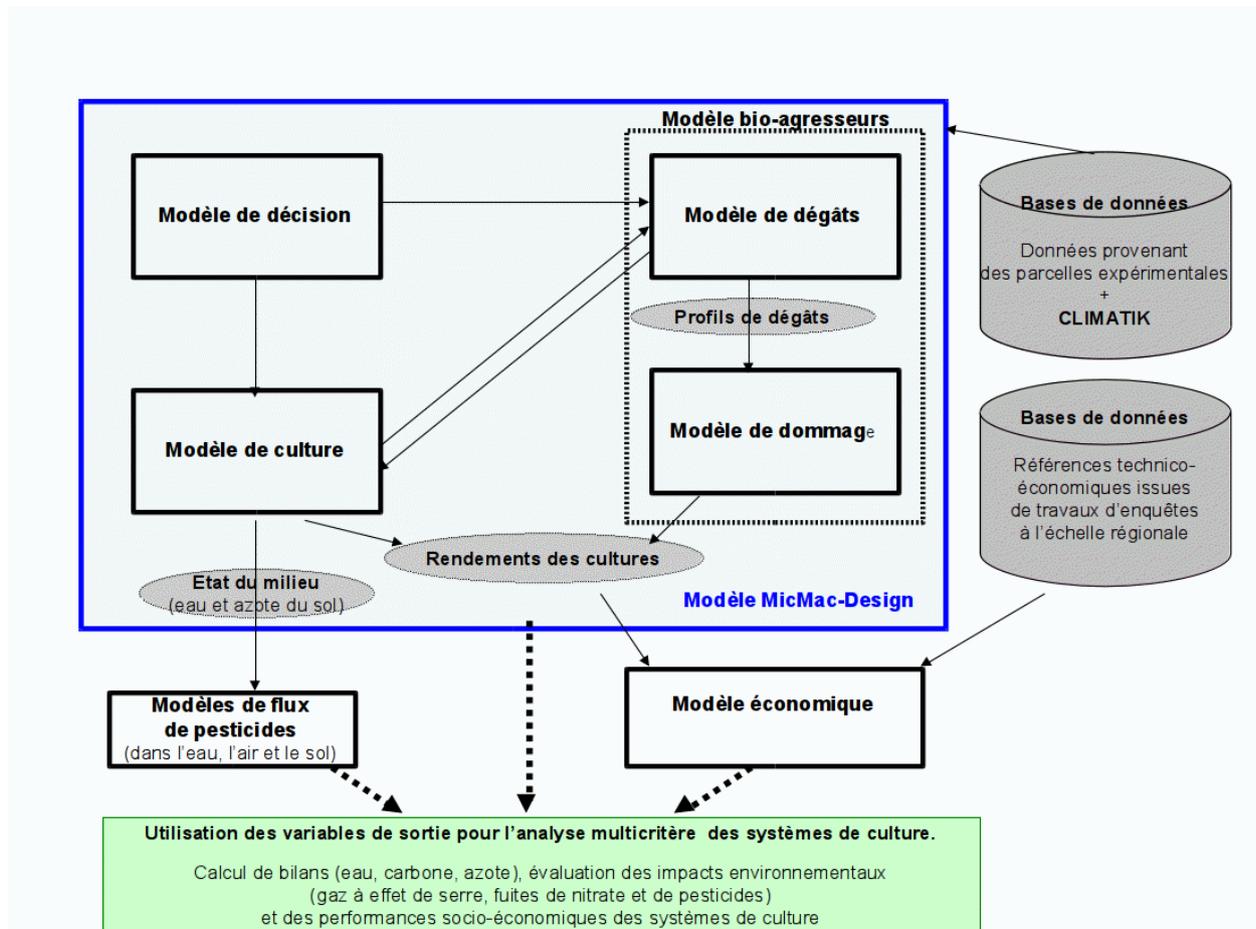
Une des originalités du projet concerne sa mise en œuvre par deux voies complémentaires : i) l'approche par prototypage de nouveaux systèmes de culture qui sont ensuite évalués en expérimentation au champ et ii) l'approche par modélisation et par simulation informatique. Cette dernière permet par exemple d'extrapoler les résultats obtenus au champ à d'autres contextes pédoclimatiques. Un des volets de ce projet concerne la conception et la réalisation d'un cadre de modélisation et de simulation adapté à notre problématique. Nous détaillons ici la conception et l'implémentation de ce cadre, en nous focalisant sur les aspects de couplage du modèle Stics à un modèle de décision, pour simuler au plus près la réalisation de l'itinéraire technique a priori. Ce couplage est implémenté sur la plate-forme Record (Bergez *et al.*, 2012) et représente un fort enjeu méthodologique pour la conception « automatique » de systèmes de culture innovants.

Matériels et méthodes

Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel est composé de quatre parties principales (figure 1) : i) le modèle MicMac-Design qui correspond au couplage du modèle de culture (Stics) avec le modèle de décision (opérations culturales de l'itinéraire technique et modalités de décision sur la base de règles de décision (Dury, 2011)) et le modèle de bio-agresseurs (sur la base d'un modèle couplé dégâts-dommages (Willocquet *et al.*, 2008)), ii) le modèle de flux de pesticides, iii) le modèle économique et iv) deux bases de données centralisant les données afférentes aux expérimentations aux champs et les données technico-économiques.

Figure 1 : cadre conceptuel du projet MicMac-Design



Implémentation du modèle MicMac-Design

Les quatre modèles composant le modèle MicMac-Design ont été implémentés informatiquement en autant de modèles sur la plate-forme Record, suivant une approche « boîte noire » pour renforcer la généricité du cadre conceptuel. Chaque modèle a été traité de manière séparée. Un modèle « météo » a été utilisé pour injecter à chaque pas de temps de la simulation les variables climatiques nécessaires aux autres modèles. Les interactions entre ces modèles ont été définies en autant de flux d'informations transitant par les ports d'entrée et de sortie de ces derniers. La plate-forme Record garantit la cohérence des couplages et offre des services facilitant le paramétrage et le pilotage des simulations.

Couplage modèle de décision et modèle de culture avec application au modèle Stics

Même si le modèle MicMac-Design a été conçu pour être le plus générique possible, il est nécessaire de pouvoir le tester en l'appliquant à quelques prototypes de systèmes de culture spécifiés par les

agronomes du projet, et en choisissant un modèle de culture dans la gamme des modèles proposés par la plate-forme. Le modèle Stics a ainsi été choisi compte tenu de sa capacité à simuler la plupart des espèces considérées dans le projet. La version utilisable sur la plate-forme consiste en une « encapsulation informatique » du code source original « ModuloStics » (version 7 de Stics), avec rajout de fonctionnalités lui permettant i) d'être utilisable sur la plate-forme, ii) de spécifier des rotations culturales via un paramétrage (figure 2), iii) de pouvoir réaliser un couplage avec un modèle de décision externe et iv) de recevoir des variables météorologiques grâce à un couplage avec un modèle « météo » externe. Un modèle de décision générique a été conçu en utilisant le formalisme proposé dans Record. Il est basé sur la définition des opérations culturales avec pour chacune d'elle, la spécification d'une fenêtre temporelle dans laquelle l'opération culturale doit se réaliser. La réalisation des opérations culturales est soumise à des règles de décision basées sur la simulation de l'état du système (état de la plante, état hydrique du sol, ...). Les itinéraires techniques *a priori* définis par les agronomes pour les prototypes de systèmes de culture évalués dans MicMac, ont été repris et formalisés. Nous avons considéré qu'une opération culturale pouvait être déclenchée de trois manières : 1) optimale, 2) dégradée et 3) forcée, pour traduire le fait que l'on relâche des contraintes au fur et à mesure que le temps passe et que l'on se rapproche de la date butoir de réalisation de l'opération culturale. Cela entraîne pour une opération culturale donnée, la spécification de trois règles dans le modèle de décision (figure 3). On peut souligner que l'implémentation informatique d'un modèle de décision pour un prototype de système de culture est indépendante du modèle de culture auquel il est couplé (par contre, suivant comment le modèle est conçu, il peut ne pas réagir aux événements envoyés par le modèle de décision). Par ailleurs, un script est en cours de test pour générer de manière automatisée à partir de la base de données MicMac-Bdd, le plan des opérations culturales dont un extrait est donné en figure 3. Cette base de données centralise l'ensemble des données des protocoles expérimentaux et les observations aux champs.

Figure 2 - Paramétrage dans l'interface graphique gvle de Record permettant de spécifier une rotation, ici pour le prototype « sorgho, tournesol, blé dur ».

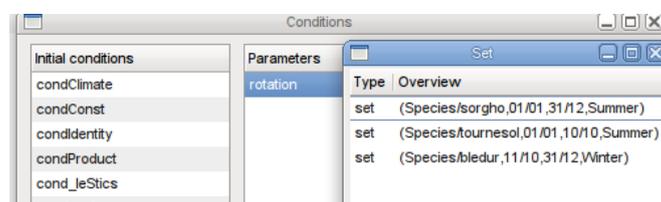


Figure 3 - Exemple de spécification des trois règles pouvant déclencher le semis du tournesol. La règle « Semis précoce » est basée sur le fait que l'humidité du sol doit être favorable (prédicats (équivalent à un booléen) « humiditéFavorable »), date inférieure au 15 avril (prédicat « Avant15avril »), temps clémente (prédicat « tempsChaud ») et peu de vent (prédicat « ventFaible »).

Pour la règle « semis tardif », la contrainte « tempsChaud » est relâchée, pour la règle « SemisForcé », on impose de semer à la date butoir de l'opération semis si cela n'a pas été fait auparavant.

```

24 rule {
25     id = "regleSemisPrecoce";
26     predicates = "humiditeFavorable", "avant15Avril", "tempsChaud", "ventFaible";
27 }
28 rule {
29     id = "regleSemisTardif";
30     predicates = "humiditeFavorable", "apres15Avril", "ventFaible";
31 }
32 rule {
33     id = "regleSemisForce";
34     predicates = "finPeriodeSemis";
35 }

```

Conclusion

A mi-parcours du projet ANR MicMac-Design, même si le cadre n'est pas terminé, une première version est opérationnelle et pourrait être d'ores et déjà mobilisée pour extrapoler ou tester la robustesse de certains résultats expérimentaux. Compte tenu de son caractère intégratif (couplage de modèles issus de différentes disciplines), il peut être utilisé dans différents contextes. Par ailleurs, sa généricité et la souplesse offerte par la plate-forme Record en termes de substitution d'un modèle par un autre et de rajout de modèles, confère à ce cadre un potentiel d'exploitation. Dans ce type de projet portant sur la conception de systèmes de culture innovants, on peut souligner l'intérêt d'utiliser le modèle Stics, en particulier pour sa capacité à simuler un grand nombre d'espèces (grande culture et cultures intermédiaires) et potentiellement de cultivars, ainsi qu'un grand nombre de techniques culturales.

Références bibliographiques :

- Bergez J.-E., Chabrier P., Gary C., Jeuffroy M.H., Makowski D., Quesnel G., Ramat E., Raynal H., Rouse N., Wallach D., Debaeke P., Durand P., Duru M., Dury J., Faverdin P., Gascuel-Oudoux C., Garcia F., 2012 - An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems. *Environmental Modelling and Software*, In Press.
- Dury, J., 2011 - The Cropping-plan decision-making: a farm level modelling and simulation approach. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 237 p.
- Willocquet L., Aubertot J.N., Lebard S., Robert C., Lannou C., Savary S., 2008 - Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research*, 107(1), 12-28.

ELABORATION D'INDICATEURS DE PERTES DE RENDEMENT DUES A LA ROUILLE BRUNE DU BLE A L'AIDE DU MODELE COUPLE STICS-MILA ET DE META-MODELES DERIVES

Serge Zaka¹, Marie Launay¹, Julie Caubel¹, Dominique Ripoché¹, David Gouache²

¹ INRA, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

² ARVALIS, IBP – Université Paris Sud, 91405 Orsay, France

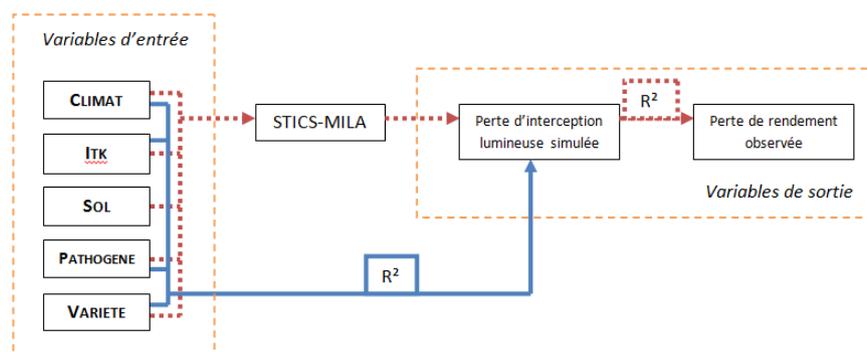
Mots-clés

Méta-modèle, rouille brune, Stics-Mila, blé, perte de rendement

Introduction

L'impact du changement climatique sur la santé des plantes est un enjeu agronomique crucial dans le contexte actuel de crise alimentaire. Estimer les pertes de rendement liées aux maladies des cultures et proposer des pistes d'adaptation à court et moyen terme nécessitent de créer des outils capables d'intégrer à la fois les interactions complexes entre l'environnement de la culture (climat et sol), les techniques agricoles, le cycle de développement de la plante et celui des pathogènes. Caubel *et al.* (2012) ont développé le module Mila qui, couplé au modèle Stics, est capable de simuler le développement de la rouille brune sur le blé en intégrant la triple interaction « plante-(micro)climat-pathogène ». Cependant, le modèle n'estime pas les éventuelles pertes de rendement dues à la maladie. Dans un premier temps, nous avons cherché à estimer des pertes de rendement à partir des variables de sortie fournies par le modèle, en nous appuyant sur des observations réalisées par l'institut Arvalis (figure 1, traits pointillés). Puis, afin d'obtenir une estimation de ces mêmes pertes à l'aide d'un nombre réduit de variables faciles d'accès, nous avons adopté une démarche de « méta-modélisation » : nous avons établi des régressions simples qui, à partir de variables climatiques pertinentes, ont permis de calculer directement ces mêmes pertes de rendement sans utiliser le modèle (figure 1, trait plein).

Figure 1 - Schéma de l'étude (trait pointillé = estimation des pertes de rendement à l'aide d'une variable intermédiaire ; trait plein = chemin pris par le méta-modèle afin d'estimer les pertes de rendement)



Matériels et méthodes

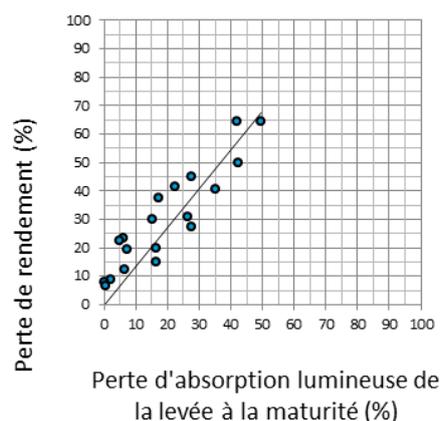
Le modèle Stics-Mila a tout d'abord été complété avec l'ajout de deux nouveaux formalismes : la consommation d'une partie des assimilats par le pathogène et l'effet « puits » du pathogène qui stimule la photosynthèse durant la phase de sporulation. Nous avons ensuite cherché à relier des variables de sortie du modèle (pertes d'absorption lumineuse ou d'accumulation de matière sèche

dues à la rouille) à des pertes de rendement mesurées. Ces variables de sortie ont été intégrées sur 3 périodes : de la levée à la maturité des grains, de la floraison moins 30 jours à la maturité et de la floraison à la maturité. Les pertes de rendement mesurées sont issues de mesures réalisées sur des essais en plein champ par Arvalis sur 19 situations (6 sites x 12 années) (essais traités/non traités). Enfin, nous avons construit deux méta-modèles : l'un en situation saine qui prédit le rendement et l'autre en situation malade qui prédit la perte d'absorption lumineuse de la levée à la maturité : l'utilisation de ces deux méta-modèles et de la relation établie précédemment (entre perte d'absorption lumineuse et perte de rendement) doit ainsi permettre d'estimer le rendement d'une culture malade. Nous avons d'abord effectué une sélection pertinente « d'indicateurs » parmi les variables d'entrée du modèle. Nous avons ensuite utilisé Stics-Mila pour simuler le rendement ou la perte d'absorption lumineuse sur 8 sites aux climats différents et 25 années en moyenne, avec et sans maladie (avec 6 niveaux de densités d'inoculum initial). Puis nous avons cherché à établir des régressions entre ces indicateurs et les sorties du modèle calculées pour ces quelques 2000 simulations. Les indicateurs retenus pour la construction des méta-modèles sont essentiellement climatiques. Ils sont basés sur les stades de développement de la plante de façon à prendre en compte l'évolution de la phénologie de la plante avec le changement climatique. La qualité prédictive du méta-modèle a été évaluée à l'aide de jeux de données indépendants de ceux qui ont servi à son élaboration.

Résultats

Les relations entre la perte d'absorption lumineuse et la perte de rendement fournissent de meilleures corrélations que celles établies à partir de la perte d'accumulation de matière sèche ($0,81 < R^2 < 0,84$ et $0,72 < R^2 < 0,81$ respectivement). Le modèle est également meilleur après l'ajout de nouveaux formalismes, mettant ainsi en évidence l'influence des processus représentés sur les pertes de rendement. La perte d'absorption lumineuse intégrée sur l'ensemble du cycle est finalement l'indicateur calculé par le modèle Stics-Mila donnant la meilleure estimation de la perte de rendement ($R^2=0,84$) (figure 2).

Figure 2 - Corrélation entre la perte de rendement et la perte d'absorption lumineuse de la levée à la maturité

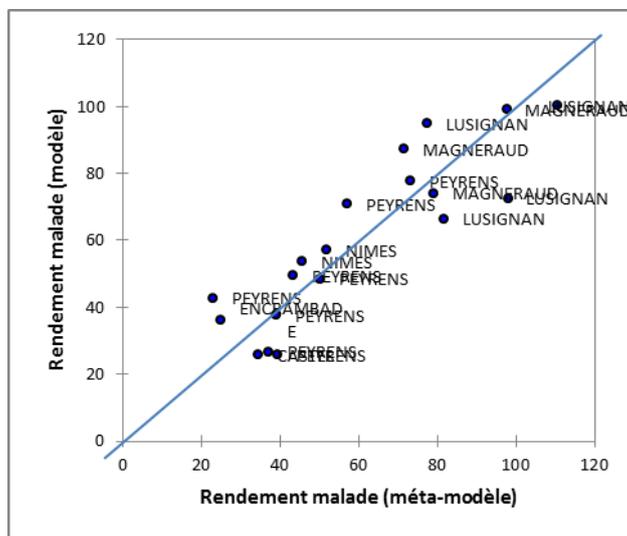


Nous avons retenu deux méta-modèles : le premier est une régression linéaire calculant le rendement d'une culture saine à partir de 9 variables caractérisant le climat et l'espèce (blé dur ou blé tendre) ($R^2=0,78$). Le second calcule la perte d'absorption lumineuse d'une culture malade à partir de 11 variables caractérisant le climat, l'espèce et la quantité d'inoculum primaire disponible ($R^2=0,75$). Grâce à la relation établie précédemment (liant perte de rendement et perte d'absorption lumineuse), nous avons donc pu obtenir une estimation de rendements sur des cultures de blé touchées par la rouille brune (figure 3).

La construction d'un méta-modèle nous permet d'estimer une tendance à un instant donné et de prendre des décisions avec peu d'informations. A cette facilité de calcul s'ajoute une spatialisation

simple des indicateurs du méta-modèle. Le méta-modèle prend donc tout son intérêt lors d'applications au changement climatique.

Figure 3 - Comparaison entre les rendements en situation malade estimés par le modèle et le méta-modèle



Références bibliographiques

Caubel J., Launay M., Ripoché D., Brisson N. 2012 - Développement d'un modèle de maladies fongiques aériennes couplé au modèle de culture Stics. *Séminaire Stics*, Sainte-Montaine (France), 16-19 octobre 2012.

LISTE DES PARTICIPANTS

AFFHOLDER François
Cirad
TA B 102/07
Avenue d'Agropolis
34398 MONTPELLIER
affholder@cirad.fr

BASSU Simona
INRA-AgroParisTech - UMR d'agronomie
Bâtiment EGER - BP 01
78850 THIVERVAL-GRIGNON
simona.bassu@grignon.inra.fr

BAUX alicia
route de duillier
1260 NYON
SUISSE
alice.baux@acw.admin.ch

BEAUDOIN Nicolas
INRA – US1158 AgrolImpact
Pôle d'activité du Griffon
180 rue Pierre-Gilles de Gennes
02000 BARENTON-BUGNY
Nicolas.Beaudoin@laon.inra.fr

BECEL carole
INRA - UMR1347 Agroécologie,
bat. Coste, 17 rue sully,
21065 DIJON
carole.becel@dijon.inra.fr

BERTHOMME Marie-laure
16 rue de la Sardane
34070 MONTPELLIER
mlberthomme@gmail.com

BERTUZZI Patrick
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9
patrick.bertuzzi@avignon.inra.fr

BLANCHOU HÉLÈNE
UMR Sisyphe - EPHE-UPMC-CNRS
4, place Jussieu
Tour 46, 4e étage
75252 PARIS cedex 5
helene.blanchoud@upmc.fr

BUIS Samuel
INRA - UMR1114 EMMAH
Domaine Saint Paul - Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
samuel.buis@paca.inra.fr

BUREL Enguerrand
INRA – UMR EGC
78850 THIVERVAL-GRIGNON
enguerrand.burel@etud.u-picardie.fr

CARRIER Marion
Ecole Centrale de Paris
Centrale Recherche S.A.
Grande Voie des Vignes
92295 CHATENAY-MALABRY CEDEX
marion.carrier@ecp

CASELLAS Eric
INRA – UR875 BIA
24 chemin de borde rouge
31326 CASTANET-TOLOSAN
eric.casellas@toulouse.inra.fr

CAUBEL Julie
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9
jcaubel@avignon.inra.fr

CHANZY André
INRA-UAPV - UMR 1114 EMMAH
Domaine St Paul
Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
achanzy@avignon.inra.fr

CONSTANTIN Julie
INRA
Direction Expertises-Prospectives-Etudes
147 rue de l'université
75338 PARIS Cedex 07
julie.constantin@toulouse.inra.fr

COUCHENEY Elsa
INRA – US1158 AgroImpact
Pôle d'activité du Griffon
180 rue Pierre-Gilles de Gennes
02000 BARENTON-BUGNY
elsa.coucheney@laon.inra.fr

COUTURIER Alain
INRA – UR0272 USS
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 – Ardon
45075 ORLEANS CEDEX 2
alain.couturier@orleans.inra.fr

CUFI julien
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9
julien.cufi@avignon.inra.fr

DENEUFBOURG Mathieu
Université de Gembloux
Passage des Déportés, 2
5030 GEMBLOUX
BELGIQUE
mathieu.deneufbourg@ulg.ac.be

de NOBLET Nathalie
CEA-CNRS-UVSQ - UMR LSCE
Bât. 712 Orme des Merisiers
Pt courrier 132
91191 GIF SUR YVETTE CEDEX
nathalie.de-noblet@lscce.ipsl.fr

DE SANCTIS Giacomo
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9
gdesanctis@avignon.inra.fr

DHAOUADI Ahmed karim
INRA – UMR EGC
78850 THIVERVAL-GRIGNON
kdhaouadi@gmail.com

DEFONDS véronique
INRA - UMR1114 EMMAH
Domaine de St paul
Site Agoparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
desfonds@avignon.inra.fr

DESWARTE Jean-Charles
ARVALIS Institut du Végétal
Rue de Noetzlin - Bât. 630
91405 ORSAY Cedex
jc.deswarte@arvalisinstitutduvegetal.fr

DUMONT Benjamin
Université de Gembloux
Passage des déportés, 2
5030 GEMBLOUX
BELGIQUE
benjamin.dumont@ulg.ac.be

ESCOBAR-GUTIERREZ Abraham
INRA - UR0004 P3F
route de Saintes
BP 6
86600 LUSIGNAN
abraham.escobar@lusignan.inra.fr

GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI Iñaki
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul - Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
igarcia@avignon.inra.fr

GERVOIS sébastien
CETIOM
avenue Lucien Brétignères
78850 THIVERVAL-GRIGNON
gervois@cetiom.fr

GOUTOULY Jean-Pascal
INRA - UMR EGFV
Institut des Sciences de la Vigne et du Vin.
261 chemin de leysotte
33140 VILLENAVE D'ORNON
jean-pascal.goutouly@bordeaux.inra.fr

GRAUX Anne-Isabelle
INRA 6 UR0874 UREP
5 chemin de Beaulieu
63000 CLERMONT-FERRAND
Anne-Isabelle.Graux@clermont.inra.fr

GROSSEL Agnès
INRA – Unité de Science du Sol
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 – Ardon
45075 ORLEANS CEDEX 2
agnes.grossel@orleans.inra.fr

GUERIF Martine
INRA-UAPV - UMR 1114 EMMAH
Domaine St Paul
Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
martine.guerif@avignon.inra.fr

HABETS Florence
Mines Paristech – UMR Sisyphe
35 rue St Honoré
77305 FONTAINEBLEAU
florence.habets@mines-paristech.fr

HEZARD Pauline
Ecole Centrale de Paris
Centrale Recherche S.A.
Grande Voie des Vignes
92295 CHATENAY-MALABRY CEDEX
pauline.hezard@ecp.fr

HUBER Laurent
INRA – UMR EGC
78850 THIVERVAL-GRIGNON
laurent.huber@grignon.inra.fr

HUMBLLOT pierre
14 rue d'ourdy
77550 REAU
pierre.humbloit@grignon.inra.fr

IRFAN Kamran
INRA-UAPV - UMR 1114 EMMAH
Domaine St Paul
Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
kamran.irfan@avignon.inra.fr

JAYET Pierre-Alain
INRA – Economie Publique
78850 THIVERVAL-GRIGNON
jayet@grignon.inra.fr

JUSTES Eric
INRA - UMR 1248 AGIR
chemin de Borde-Rouge BP 52627
31326 CASTANET-TOLOSAN CEDEX
eric.justes@toulouse.inra.fr

LACROIX Bernard
ARVALIS – Institut du Végétal
Service Agronomie-Economie
6 chemin de la côte vieille
31450 BAZIEGE
b.lacroix@arvalisinstitutduvegetal.fr

LAUNAY Marie
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9
marie.launay@avignon.inra.fr

LE BAS Christine
INRA – Unité InfoSol
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 – Ardon
45075 ORLEANS CEDEX 2
christine.le-bas@orleans.inra.fr

LECHARPENTIER Patrice
INRA-UAPV - UMR 1114 EMMAH
Domaine Saint Paul
Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
patrice.lecharpentier@paca.inra.fr

LEONARD Joël
INRA – US1158 AgrolImpact
Pôle d'activité du Griffon
180 rue Pierre-Gilles de Gennes
02000 BARENTON-BUGNY
leonard@laon.inra.fr

LUNGARSKA Anna
Av Lucien Brétignières
78850 THIVERVAL-GRIGNON
anna.lungarska@grignon.inra.fr

MACENA Fernando
SQN 115, Bloco C, AP 603
80772030 BRASILIA
BRESIL
macenafam@gmail.com

MAMY Laure
INRA, UMR EGC
Sol - Bâtiment EGER
78850 THIVERVAL-GRIGNON
laure.mamy@versailles.inra.fr

MARY Bruno
INRA – US1158 AgrolImpact
Pôle d'activité du Griffon
180 rue Pierre-Gilles de Gennes
02000 BARENTON-BUGNY
bruno.mary@laon.inra.fr

MORVAN Thierry
INRA - UMR SAS
4 rue Stang Vihan
29000 QUIMPER
morvan@rennes.inra.fr

MOULIN Sophie
INRA-UAPV – UMR 1114 EMMAH
Domaine St Paul
Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
sophie.moulin@avignon.inra.fr

NICOLETTI Jean Paul
ARVALIS Institut du Végétal
Ferme expérimentale
91720 BOIGNEVILLE
jp.nicoletti@arvalisinstitutduvegetal.fr

NICOULLAUD Bernard
INRA – UR0272 USS
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 – Ardon
45075 ORLEANS CEDEX 2
bernard.nicoullaud@orleans.inra.fr

OLIOSO Albert
INRA-UAPV - UMR 1114 EMMAH
Domaine St Paul
Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
olioso@avignon.inra.fr

PARNAUDEAU Virginie
INRA – UMR SAS
65 rue de Saint Brieuc
35042 RENNES cedex
virginie.parnaudeau@rennes.inra.fr

PASQUIER Catherine
INRA – UR0272 USS
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 – Ardon
45075 ORLEANS CEDEX 2
catherine.pasquier@orleans.inra.fr

PATTEY Elizabeth
Agriculture et Agroalimentaire Canada
960 avenue Carling
OTTAWA ON
K1A0C6
CANADA
Elizabeth.Patthey@agr.gc.ca

PERRIN Aurélie
CIRAD
TA B-103/PS4 - Boulevard de la Lironde
34398 MONTPELLIER Cedex 5
aurelie.perrin@cirad.fr

PIQUET Agnès
VETAGRO-SUP
89 avenue de l'Europe
63370 LEMPDES
agnes.piquet@vetagro-sup.fr

POUPA Jean-Claude
INRA-AGROCAMPUS - UMR1302 SMART
4 allée Adolphe Bobierre
CS 61103
35011 RENNES CEDEX
Jean-Claude.Poupa@rennes.inra.fr

POUSSINEAU Marie-Pierre
INRA – US1106 InfoSol
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 – Ardon
45075 ORLEANS CEDEX 2
marie-pierre.poussineau@orleans.inra.fr

PUGEAUX Nicolas
INRA – US1158 AgroImpact
Pôle d'activité du Griffon
180 rue Pierre-Gilles de Gennes
02000 BARENTON-BUGNY
nicolas.pugeaux@laon.inra.fr

RAYNAL Hélène
INRA – UR875 BIA
24 chemin de borde rouge
31326 CASTANET-TOLOSAN
helene.raynal@toulouse.inra.fr

RICHARD Guy
INRA - Département EA
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 – Ardon
45075 ORLEANS CEDEX 2
guy.richard@orleans.inra.fr

RIPOCHE Dominique
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9
dominique.ripoche@avignon.inra.fr

RUGET Françoise
INRA-UAPV - UMR 1114 EMMAH
Domaine St Paul
Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9
francoise.ruget@avignon.inra.fr

SANSOULET Julie
92 first avenue
OTTAWA ON
CANADA
Julie.Sansoulet@agr.gc.ca

STRULLU Loïc
INRA – US1158 AgroImpact
Pôle d'activité du Griffon
180 rue Pierre-Gilles de Gennes
02000 BARENTON-BUGNY
loic.strullu@laon.inra.fr

TRIBOUILLOIS Hélène
INRA – UMR 1248 AGIR
Chemin de Borde-Rouge - BP 52627
31326 CASTANET-TOLOSAN CEDEX
helene.tribouillois@toulouse.inra.fr

VERICEL Grégory
INRA – UMR 1248 AGIR
Chemin de Borde-Rouge - BP 52627
31326 CASTANET-TOLOSAN CEDEX
gregory.vericel@toulouse.inra.fr

ZAKA Serge
INRA – US1116 Agroclim
Domaine Saint Paul
CS 40509
84914 AVIGNON CEDEX 9
szaka@avignon.inra.fr

ZURFLUH Olivier
INRA - UMR EGC
78850 THIVERVAL-GRIGNON
olivier.zurfluh@grignon.inra.fr