Simuler la production de biomasse et les impacts environnementaux des cultures pérennes avec le modèle STICS

Loic Strullu, Fabien Ferchaud, Bruno Mary, Gaëtan Louarn, Nicolas Beaudoin

▶ **To cite this version:**

Loic Strullu, Fabien Ferchaud, Bruno Mary, Gaëtan Louarn, Nicolas Beaudoin. Simuler la production de biomasse et les impacts environnementaux des cultures pérennes avec le modèle STICS. 11. Séminaire des utilisateurs de STICS, Institut National de Recherche Agronomique (INRA). UR Unité de Recherche Pluridisciplinaire Prairies et Plantes Fourragères (0004)., Oct 2017, La Rochelle, France. 99 p. hal-02733783

HAL Id: hal-02733783
https://hal.inrae.fr/hal-02733783

Submitted on 2 Jun 2020

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

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

Copyright

17-19 octobre 2017 - La Rochelle

ACTES

XIe séminaire des utilisateurs de STICS

INRA
SCIENCE & IMPACT

XIe SÉMINAIRE DES UTILISATEURS DE STICS

Actes du colloque
La Rochelle
17 au 19 octobre 2017

Comité scientifique :
Nicolas BEAUDOIN
Samuel BUIS
Eric JUSTES
Dominique RIPOCHE
Patrick BERTUZZI
Eric CASELLAS
Julie CONSTANTIN
Benjamin DUMONT
Jean-Louis DURAND
Iñaki GARCIA DE CORTAZAR ATAURI
Guillaume JÉGO
Marie LAUNAY
Christine LE BAS
Patrice LECHARPENTIER
Joël LEONARD
Bruno MARY
Loïc STRULLU
Françoise RUGET
Gaëtan LOUARN
Anne-Isabelle GRAUX
François AFFHOLDER

Comité d'organisation :
Gaëtan LOUARN
Loïc STRULLU
Jean-Marc CHABOSSEAU
Nathalie BONNET
Isabelle BOISSOU
Armelle PERENNES
Karine CHEVET
Eric MARCHOUX

Mise en page : Karine Chevet

ÉDITO

STICS, a 20 ans, est-ce l'âge de raison ?

L'équipe du modèle sol-plante STICS est heureuse de célébrer les 20 ans du modèle STICS à l'occasion du XIème séminaire des développeurs et utilisateurs du modèle STICS.

Il est symbolique de venir fêter cet anniversaire à La Rochelle, cette belle ville côtière sur l'Océan Atlantique, avec son musée du Nouveau Monde, et ce port si fameux, avec ses trois tours connues mondialement, port d'où partirent jadis des navires pour découvrir le monde (et les agricultures des autres mondes), en des temps où ces aventures humaines étaient des plus osées et déraisonnables !

STICS a 20 ans et quelques mois … mais ne déraisons pas ! 20 ans, c'est l'âge de raison et de la maturité du modèle, à l'instar de celle de l'Homme (mais surtout des femmes d'ailleurs !).

Un célèbre proverbe, *a priori* irlandais, dit que « La raison vient avec l'âge ». C'est sans doute vrai pour STICS, tant ces dernières années ont vu une consolidation des performances du modèle, un élargissement des processus et actes techniques simulés, qui lui a valu dorénavant l'acquisition d'une notoriété internationale. STICS est un modèle sol-culture, qui est générique, robuste et raisonnablement précis dans une large gamme de conditions de sols, climats et systèmes de culture !

Un autre proverbe dit que « La raison est la première autorité, et l'autorité la dernière raison ». Si STICS a parfois eu toutes les difficultés de l'enfance et de l'adolescence pour être reconnu et s'imposer parmi ses pairs de la modélisation des cultures, y compris ceux de dans sa propre maison (ce qui est normal si l'on en croit un autre proverbe célèbre qui dit que « nul n'est prophète en son pays »), il fait maintenant clairement autorité comme un des grands modèles sol-culture de la planète, certes celle du microcosme de la modélisation agronomique !
STICS a grandi progressivement, bien sûr de façon non linéaire mais toujours en progressant et en gardant le même cap, celui de rester raisonnable dans ses ambitions et fidèle à son cahier des charges. Ce fût sans doute le meilleur choix, et peut être n'y avait-il pas d'autre aussi raisonnable, malgré ce qu'énonce un Proverbe allemand qui fait croire que « Précoce raison, longue déraison. »…. De toute façon, « La passion commande, et la raison retient » ! (Proverbe français)

Et puis, pour en revenir à l'agriculture, et faire preuve de haute réflexion philosophique : « Devant la poule, le vers de terre n'a jamais raison ». (Proverbe Danois), ou encore, tout aussi explicite est la citation : « Jamais le maïs n'a raison contre la poule ». (Proverbe gabonais) ; on a le droit de rire sans raison, non ?

Bref, vous l'aurez compris, comme le disait si bien Pascal : « Le coeur a ses raisons que la raison ne connaît pas » ou bien « Le coeur à ses raisons que la raison ignore » ! Vous en conviendrez aisément : STICS est un modèle au cœur de l'agronomie et aujourd'hui de l'agroécologie ! Et donc, on peut souhaiter une longue vie à STICS dans toute sa déraison d'un travail éminemment collectif et passionnément déraisonnable mais dans la démesure très efficace de l'intelligence collective, qui est, convenons-en, notoirement plus forte et raisonnable que la somme des intelligences individuelles…

Pour conclure, nous vous invitons à déguster sans raison ni modération ce nouveau séminaire STICS !

Un grand MERCI et BRAVO à l'équipe d'organisation de l'INRA de Lusignan et au Président du comité d'organisation, Gaëtan le raisonnable, pour avoir organisé ce séminaire STICS avec professionnalisme et efficacité !

EJ, DR-W, ML et SB, du bureau déraisonnable de l'équipe STICS…

SOMMAIRE

KEYNOTES 6

Deconstructing crop processes and models via identities 7

New developments in dssat crop modeling: testing and adding crops 8

CONCEPTION ET ÉVALUATION DE SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS EN MOBILISANT STICS 9

Stratégies collaboratives d'adaptation des systèmes de culture européens : évaluation avec le modèle stics 10

Simulation de l'effet des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et de gaz à effet de serre dans le contexte de changement climatique 12

Impacts du semis direct avec et sans plantes de couverture sur le bilan hydrique et le rendement du maïs dans deux région du « cerrado » brésilien 15

Évaluation du modèle stics pour la simulation d'un enchaînement de cultures et son intérêt dans un contexte de changement climatique 18

UTILISATION DE STICS POUR LA RÉALISATION DE DIAGNOSTICS AGRO-ENVIRONNEMENTAUX 20

Estimation des potentiels de rendements et des écarts aux rendements potentiels pour différentes cultures dans le grand ouest grâce au modèle stics 21

Dans quelle mesure l'exportation d'azote par les prairies françaises peut-elle atténuer les pollutions azotées ? 24

Simuler la production de biomasse et les impacts environnementaux des cultures pérennes avec le modèle stics 27

NOUVEAUX FORMALISMES, PARAMÉTRAGES ET EXTENSION DU DOMAINE DE VALIDITÉ DE STICS 29

Éléments de réflexion sur l'introduction d'un module p dans le modèle stics 30

Adaptation, paramétrage et généricité du modèle stics appliqué à l'agriculture biologique 32

Impact de la modification des formalismes de réponse à la température sur les projections futures de production fourragère du modèle stics 35

Simulation des émissions de n_2o en climat continental froid et humide 37

Simulation de la production de biomasse par une culture de luzerne soumise à des itinéraires techniques contrastés avec le modèle stics 39

Modélisation avec stics des systèmes de culture avec produits résiduaires organiques : limites du modèle de décomposition de la matière organique et perspectives 41

Amélioration de la prédiction de la minéralisation de l'azote organique du sol dans stics....43

Évaluation et amélioration du module microclimatique de stics....46

COUPLAGE ET APPROCHES INTÉGRÉES MOBILISANT STICS....49

Apport d'un modèle de culture à l'analyse économique de l'impact du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation en france....50

Couplage d'un modèle de dynamique de population au modèle de culture stics afin d'étudier les interactions plante-herbivore dans un contexte spatio-temporel. Application au cas du puceron....52

Diagnostic des facteurs limitants du rendement des céréales biologiques par couplage observation *in situ* et modélisation avec stics....55

OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION MOBILISANT STICS....58

Méthode d'identification des taux optimum d'azote des cultures pluviales à l'aide de modèle de cultures....59

Produire des préconisations de conduite des cultures intermédiaires par la simulation de données virtuelles avec le modèle stics....61

Optimisation de la fertilisation azotée sur base d'un outil d'aide à la décision construit autour du modèle sol-culture stics....63

POSTERS....65

Simulation de la biomasse et du prélèvement en azote de la pomme de terre dans l'est du canada avec le modèle stics....66

Comparaison de modèles de simulation de la fléole des prés en climat nordique....68

Courbe de dilution critique de l'azote pour l'optimisation de la gestion azotée de la production de blé dur en pluvial sous l'agriculture de conservation dans les régions semi-arides de la tunisie....70

Utilisation des formalismes de stics dans un modèle de sol spatialisé destiné à la simulation individu-centrée de peuplements hétérogènes....72

Utilisation de la simulation informatique pour l'évaluation bio-économique de systèmes de culture innovants 74

Analyse comparative de l'impact des pratiques agricoles dans le bassin versant de l'aunis à partir des deux modèles stics et syst'n....77

Approche stochastique bayésienne de l'assimilation du LAI dérivé des observations satellites dans stics....78

Paramétrage de la version de recherche « plantes pérennes » du modèle stics pour une culture énergétique pérenne : le switchgrass (*panicum virgatum*)....80

Modélisation des systèmes de cultures associées à base de céréales en zones tropicales....82

Utilisation du modèle stics pour évaluer les impacts du changement climatique sur la vigne en europe 83

Modélisation des légumineuses à graines avec le modèle sol-plante *stics* : calibration et évaluation de la qualité prédictive pour le pois et la fèverole 86

Modélisation de la lixiviation, de la minéralisation et du bilan d'azote d'une expérimentation conduite pendant 34 ans en sol crayeux 88

Collecte et analyse des données, pour le paramétrage et la calibration de l'eleusine dans le modèle stics (inde) 90

Modélisation de la production et du devenir de l'azote en système biologique à long terme 92

Paramétrer une variété nouvelle de blé dans un cadre opérationnel et à partir de données issues de la télédétection et de cartes de rendement 94

Intégrer les effets de la disponibilité en azote du sol dans un modèle simulant les effets des systèmes de culture sur la flore adventice : couplage des modèles stics et FLORSYS 96

KEYNOTES

DECONSTRUCTING CROP PROCESSES AND MODELS VIA IDENTITIES

John Roy Porter

Modelling has a central role in climate change via the impact of climate on food production, agronomy and breeding to adapt to impacts and the role of agriculture in greenhouse gas (GHG) emissions and their mitigation. Partly as review and part opinion piece it presents an overview of how some of the major crop simulation models approach the issue of simulating the responses of crops to changing climatic and weather variables. It illustrates an important principle in models of a single cause having alternative effects and *vice versa*. I then show, via a new method of analysis, the links of GHG emissions both to per unit food production and to the area of cultivation. Finally, using a novel approach, I describe an approach to deconstruct crop resource use efficiencies into their constituent elements, each of which can be examined for responses to climate and climatic change. I think that the final approach might be used for practical advice by identifying what efficiencies of a cropping system need to be improved to optimise agronomy and GxExM interactions as adaptations to climate change.

NEW DEVELOPMENTS IN DSSAT CROP MODELING: TESTING AND ADDING CROPS

Kenneth J. Boote

University of Florida, kjboote@ufl.edu

This paper discusses testing of the DSSAT crop models against elevated temperature and CO_2 response data, the addition of new crops to the upcoming release of DSSAT V4.7, and plans for future model improvement. The dry bean, peanut, soybean, chickpea, sorghum, and millet models were evaluated against elevated temperature data and changes made to temperature-sensitive parameters of four of the crops over the past 10 years. Peanut and soybean models did not need modification. Code changes were made in the CERES-Millet model to allow temperature during the grain-set phase (10 days prior to anthesis) to affect the number of grains set. Similar changes are planned for the CERES-Sorghum and Maize models, along with making rate of grain-growth less sensitive to elevated temperature. Model processes sensitive to temperature include photosynthesis, respiration, leaf appearance rate, progress to reproductive stages, leaf area expansion, N-fixation, seed addition, single seed growth rate, N mobilization and leaf senescence.

New models added to DSSAT V4.7 include three CROPGRO annual crops: canola, safflower, and sunflower, as well as three CROPGRO-Perennial-Forage crops: brachiaria, cynodon, and alfalfa. The CROPGRO-Perennial Forage model has storage reserve features that allow rapid regrowth recovery after complete or partial defoliation, and that account for the carry-over effects of prior harvest management, winter cold, or prolonged dry off-season. The model has carbohydrate and N reserves in storage tissues, along with rules for using the reserves for regrowth, and for refilling the reserves after the canopy recovers.

Plans for model improvement include creating a mechanistic root growth model that is responsive to soil static and dynamic conditions, improving the soil temperature prediction, predicting compositional quality and digestibility for forages, and full re-calibration of all models especially temperature-dependent parameters.

CONCEPTION ET ÉVALUATION DE SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS EN MOBILISANT STICS

STRATÉGIES COLLABORATIVES D'ADAPTATION DES SYSTÈMES DE CULTURE EUROPÉENS : ÉVALUATION AVEC LE MODÈLE STICS

CO-DESIGNED ADAPTATION STRATEGIES TO CLIMATE CHANGE FOR EUROPEAN CROPPING SYSTEMS: EVALUATION WITH THE STICS SOIL-CROP MODEL

Anthony Vermue[1], Magali Willaume[2], Emilie Hansen[3], Moritz Reckling[4], Georg Carlsson[5], Kairsty Topp[6], Marjoleine Hanegraaf[7], Clara Lizarazo[8], Jan de Wit[9], Helena Gomez-Macpherson[10] and Eric Justes[1].

[1]Inra, Toulouse, France ; [2]ENSAT, Toulouse, France ; [3]University of Roskilde, Roskilde, Denmark ; [4]ZALF, Leibniz, Germany ; [5]SLU, Alnarp, Sweden ; [6]SRUC, Edinburgh, United Kingdom ; [7]NMI, Wageningen, Netherlands ; [8]University of Helsinki, Helsinki, Finland ; [9]LBI, Driebergen-Rijsenburg, Netherlands ; [10]CSIC, Cordoba, Spain

Mots clés : changement climatique, système de culture, Europe, adaptation, modélisation
Keywords : climate change, cropping systems, Europe, adaptation, modelling

INTRODUCTION

The project Climate-CAFE gathers 12 partners from 9 European countries (Denmark, Finland, France, Germany, Sweden, Spain, Switzerland, The Netherlands and United Kingdom) and aims at assessing and increasing the « adaptive capacity » to climate change (CC) of arable cropping and farming systems in EU. In each country, a small network, referred as "adaptation pilot", involving local agricultural stakeholders (i.e. researchers, advisors and farmers) was created aiming at ensuring local presence of the project and co-design of adaptation measures. The CC impacts on European arable cropping systems and potential adaptation measures proposed by stakeholders are evaluated with an exploratory modelling approach using the STICS soil-crop model (Brisson et al., 1998; 2002; 2003).

METHODS

Representative European cropping systems were co-designed by local researchers, advisors and farmers within each adaptation pilot. Impacts of CC on the current "control" cropping systems were evaluated with the STICS model. Future CC conditions, including atmospheric CO_2 concentrations, were estimated from the RCP8.5 scenario (Moss et al., 2010). Adaptations measures were co-designed according to local climatic predictions, constraints and opportunities, including e.g. cover crops and legume introduction and alternative irrigation amount and timing. Potential agronomic and environmental performances of adaptations were assessed using STICS.

Table 1: list of co-designed and simulated measures per country

Site	Adaptation and mitigation measures
Denmark	Cover crops / legumes
Finland	Cover crops / legumes / grassland / reduced tillage
France	Supplemental irrigation / permanent cover / legumes / extended rotation
Spain	Supplemental irrigation / permanent cover / legumes
Sweden	Cover crops / legumes / grassland

RESULTS AND DISCUSSION

The model STICS was able reproduce the current situation of the cropping systems in the different agronomic and geographic contexts. However some specific crop rotations (i.e. including sweet maize, cotton or direct sowing) could not be accurately simulated.
A global increase of wheat yields was simulated in response to CC in Europe (Fig. 1), except for Spain. Yield variability also trended to increase; however cropping systems were identically simulated each year without considering annual climate variability and potential adjustments.

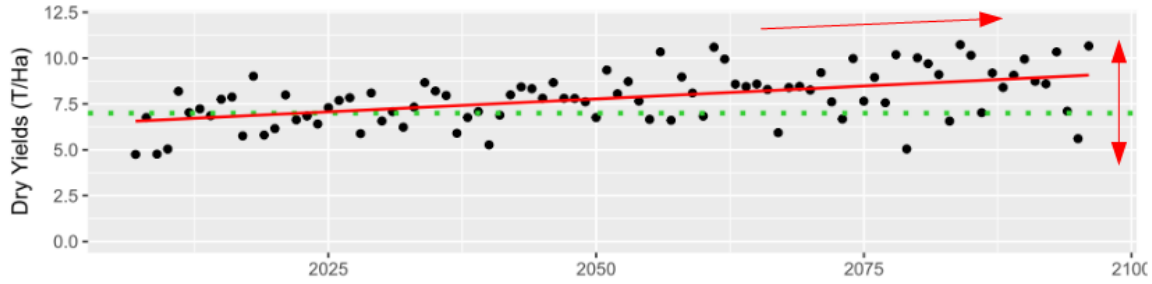


Figure 1: Significant yield increase simulated for winter wheat in southwest France under CC conditions. Cover crop biomass also significantly increased, inducing an increase of organic C storage at long-term term. Supplemental irrigation could contribute to increasing yields where irrigation is possible.

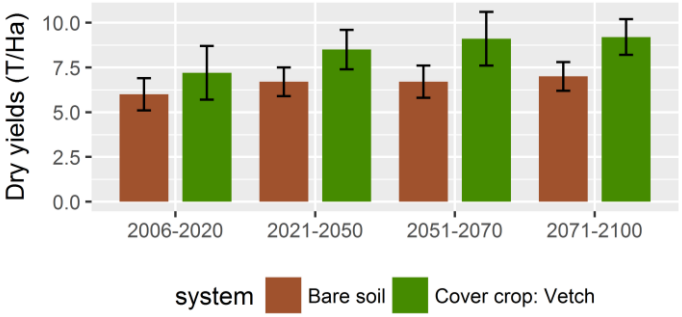


Figure 2: Significant increase of wheat yields after the introduction of cover crops in the rotation in Sweden.

Legumes can contribute to increase the N uptake of the succeeding wheat, which may increase wheat yields and/or grain protein content. The performances of co-designed adaptation measures differed between pedoclimatic contexts, reinforcing the necessity of their adaptation to local conditions to be relevant in the proposed solutions.

REFERENCES

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

Brisson N.,Ruget F.,Gate P., Lorgeou J., 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 wheat and corn. Agronomie, 22, 69-93

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., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model stics. EUR. J. Agron. 18, 309-332

Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., VAN Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Stouffer R.J., Thomson A.M., Weyant J.P., Wilbanks T.J., 2010 - The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756.

SIMULATION DE L'EFFET DES CULTURES INTERMÉDIAIRES SUR LES BILANS D'EAU ET DE GAZ À EFFET DE SERRE DANS LE CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

SIMULATION OF COVER CROPS IMPACT ON WATER AND GREENHOUSE GASES BALANCES UNDER CLIMATE CHANGE

Hélène Tribouillois, Julie Constantin et Eric Justes

INRA – UMR AGIR INRA-INPT, Toulouse-Auzeville, France

Mots clés : scénario, long terme, paramétrage, eau, carbone, gaz à effet de serre
Keywords : scenario, long term, parameterization, water, carbon, greenhouse gases

INTRODUCTION

Les cultures intermédiaires sont semées entre deux cultures de vente (interculture) pour produire des services écosystémiques notamment pour gérer l'azote (Thorup-Kristensen et al., 2003; Tribouillois et al., 2016a) mais aussi pour améliorer le bilan Gaz à Effet de Serre (GES). Cependant, elles peuvent également avoir un impact sur le cycle de l'eau. L'objectif de notre étude était d'évaluer l'impact des cultures intermédiaires sur l'eau et le bilan GES sur le long terme et dans le contexte du changement climatique. Pour cela, le recours à la simulation en dynamique est nécessaire. Le modèle STICS a été choisi car il a déjà été évalué comme performant pour simuler les dynamiques de l'eau, du C, du N_2O (Constantin et al., 2011; Coucheney et al., 2015; Plaza-Bonilla et al., 2017). De plus, trois espèces de cultures intermédiaires étaient déjà calibrées dans STICS ; en revanche un focus sur la simulation de la levée des cultures intermédiaires était nécessaire afin de simuler des scénarios réalistes. En effet, l'étape de la levée des cultures intermédiaires est cruciale car elle conditionne la qualité de l'implantation du couvert et donc la production de services. De plus, ces espèces sont généralement semées en fin d'été, dans des conditions souvent difficiles du fait de stress hydrique et de température élevée du sol, notamment dans le sud de la France, ce qui était nécessaire de bien représenter dans les scénarios.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans un premier temps, nous avons réalisé un travail sur la levée de dix espèces de cultures intermédiaires dans STICS. Nous avons calibré six paramètres impliqués dans le processus de levée. Certains ont été renseignés sur la base de mesures réalisées au laboratoire dans une précédente étude (température de base, potentiel hydrique de base, temps avant la germination) (Tribouillois et al., 2016b). Pour les autres, une optimisation mathématique a été réalisée avec OptimiSTICS (Wallach et al., 2011) sur la date de levée observée (sensibilité des racines au stress hydrique, paramètres d'élongation du coléoptile). L'évaluation du nouveau jeu de paramètres a été réalisée pour quatre des dix espèces en raison du nombre limité de données disponibles. La base de données utilisée pour la calibration et la validation a été construite à partir de 18 sites expérimentaux sur des années climatiques variables ce qui constitue un jeu de données contrasté en termes de conditions de levée (humidité au semis, pluviométrie, type de sol...).
Dans un second temps, nous avons simulé 77 scénarios représentatifs de trois systèmes de culture de Midi-Pyrénées, répartis sur 7 sites pédoclimatique contrastés. Pour chaque système de culture, 2 à 3 rotations comprenant plus ou moins de légumineuses ont été évalués. Pour chaque rotation, nous avons simulés un témoin sans couverts (sol nu) pendant les intercultures puis avec différentes espèces de cultures intermédiaires (moutarde, raygrass, avoine rude, vesce ou trèfle incarnat). Les simulations ont été réalisées avec le scénario de changement climatique RCP 4.5 (GIEC) de 2006 à 2053. L'évapotranspiration et le drainage ont été simulés pour évaluer l'impact des cultures

intermédiaires sur le bilan d'eau. L'évolution du stock de carbone du sol et les émissions de N2O ont été simulés pour évaluer le bilan GES (converti en équivalent CO2).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La calibration de STICS a permis d'améliorer significativement la prédiction de la date de levée avec une moyenne de 3 jours d'écart entre les simulations et les observations en calibration et 4 jours d'écart en validation, contre 9 jours d'écart avec l'ancien jeu de paramètres.
Pour toutes les situations des scénarios, les simulations indiquent que les cultures intermédiaires augmentent l'évapotranspiration réelle en raison de la transpiration accrue proportionnellement à leur biomasse. Cela a pour effet conjoint de réduire le drainage, ce qui peut être bénéfique pour limiter la lixiviation des nitrates mais peut impacter négativement la recharge des nappes et l'eau disponible pour la culture suivante. Sur le long terme, la différence entre les cultures intermédiaires et le sol nu est accrue en raison d'une augmentation de la biomasse favorisée par des températures et des quantités de rayonnement solaire plus élevées.
Pour tous les sites et les rotations de cultures, les cultures intermédiaires améliorent le bilan GES (Figure 1) puisqu'elles réduisent les émissions annuelles de CO_2 de 300kg en moyenne ha^{-1} (toutes modalités confondues). Cette amélioration du bilan GES est due à une augmentation de la séquestration du C dans les sols malgré une augmentation conjointe des émissions de N_2O mais en quantité plus faible. Les cultures intermédiaires permettent donc de participer à l'atténuation du changement climatique sur le long terme.

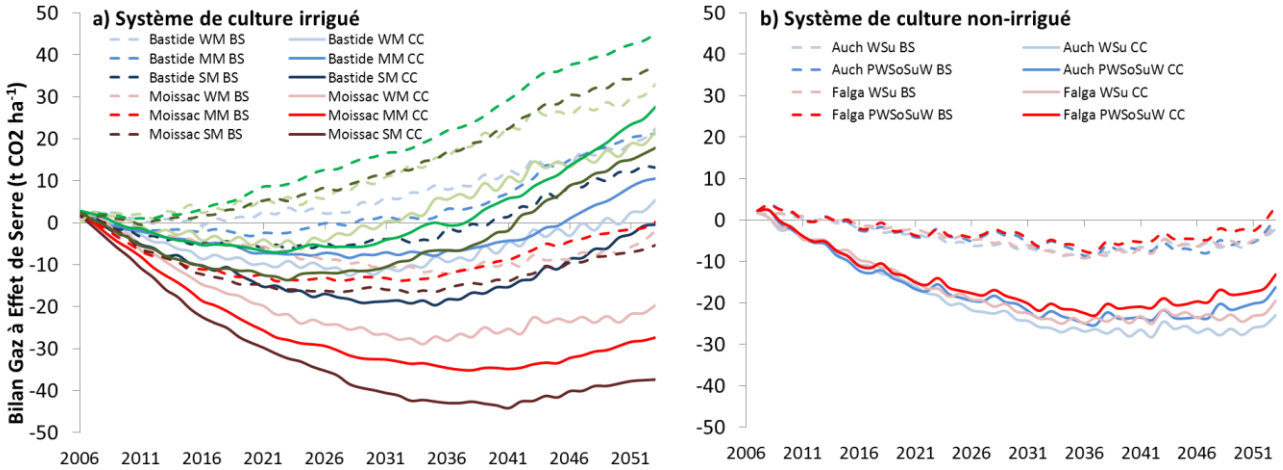


Figure 1 : Evolution du bilan Gaz à Effet de Serre pour deux systèmes de culture pour les différentes rotations (WM : blé-maïs, MM : maïs-maïs, SM : soja-maïs, WSu : blé-tournesol, PWSoSuW : pois-blé-sorgho-tournesol-blé) avec cultures intermédiaires (CC) et en sol nu (BS)

CONCLUSION

Le modèle STICS a permis de simuler différents scénarios comprenant diverses espèces de vente et de cultures intermédiaires dans le contexte de changement climatique. Ainsi les simulations montrent l'impact positif de l'introduction de cultures intermédiaires sur le bilan GES et l'impact plus mitigé de ces espèces sur le bilan d'eau. En conclusion, l'implantation de cultures intermédiaires dans les rotations est une pratique que les agrosystèmes doivent développer et adapter dans le contexte du changement climatique pour encourager une production agroécologique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Constantin, J., Beaudoin, N., Laurent, F., Cohan, J.-P., Duyme, F., Mary, B., 2011. Cumulative effects of catch crops on nitrogen uptake, leaching and net mineralization. Plant Soil 341, 137–154.

Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F.F., Garcia de Cortazar, I., Andrianarisoa, S., Justes, E., Léonard, J., García de Cortázar-Atauri, I., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F.F., Andrianarisoa, K.S., Le Bas, C., Justes, E., Léonard, J., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS v-8 soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions. Environ. Model. Softw. 64, 177–190.

Plaza-Bonilla, D., Léonard, J., Peyrard, C., Mary, B., Justes, É., 2017. Precipitation gradient and crop management affect N2O emissions: Simulation of mitigation strategies in rainfed Mediterranean conditions. Agric. Ecosyst. Environ. 238, 89–103.

Thorup-Kristensen, K., Magid, J., Jensen, L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. Adv. Agron. 79, 227–302.

Tribouillois, H., Cohan, J.P., Justes, E., 2016a. Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling. Plant Soil 401, 347–364.

Tribouillois, H., Dürr, C., Demilly, D., Wagner, M., Justes, E., 2016b. Determination of Germination Response to Temperature and Water Potential for a Wide Range of Cover Crop Species and Related Functional Groups. PLoS One 11, e0161185.

Wallach, D., Buis, S., Lecharpentier, P., Bourges, J., Clastre, P., Launay, M., Bergez, J.-E.E., Guerif, M., Soudais, J., Justes, E., 2011. A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. Environ. Model. Softw. 26, 386–394.

IMPACTS DU SEMIS DIRECT AVEC ET SANS PLANTES DE COUVERTURE SUR LE BILAN HYDRIQUE ET LE RENDEMENT DU MAÏS DANS DEUX RÉGION DU « CERRADO » BRÉSILIEN

IMPACTS OF NO-TILL WITH AND WITHOUT COVER CROPS ON SOIL WATER BALANCE AND MAIZE YIELD IN TWO LOCATIONS OF THE BRAZILIAN CERRADO

Fernando Antônio Macena da Silva[1], François Affholder[2], Marc Corbeels[2], Eric Scopel[1], Krishna Naudin[1,2]

[1] Embrapa-Cerrados, 73310-970, Planaltina, DF, Brazil ; [2] CIRAD, Agroécologie et intensification durable des cultures annuelles, 34398 Montpellier, France

Mots clés : non-labour, agriculture de conservation, fenêtre de semis, ruissellement, drainage, maïs, mil
Keywords : no-till, conservation agriculture, sowing window, runoff, drainage, maize, millet

INTRODUCTION

One of the technologies currently used by farmers in the Brazilian Cerrado (tropical highland savannah) are the no-till, mulch based cropping systems with or without the use of cover crops. These systems that involve numerous changes in the way the soil and the plant biomass are managed, were first introduced in the region in the 1990s, mainly because of their capacity to combat soil erosion and water runoff (Lal et al., 1998; Silva et al. 2004; Resck, et al., 2000). Under certain climates, this leads to higher soil available water, crop transpiration and yield and a smaller risk of crop failure across years (Scopel et al., 2004). The main objective of this study was to compare the performance of maize-based conventional systems with that of no-till systems with and without a cover crop (*Pennisetum glaucum*) in terms of water runoff, drainage, soil water balance and maize yield, and their inter-annual variability, across two contrasted climates of the Brazilian Cerrado and a range of sowing dates.

MATERIALS AND METHODS

We used the crop growth model STICS (v3) that was calibrated and tested against crop (maize and millet) and soil data from an agronomic field trial at the experimental station of Embrapa Cerrados at Planaltina (15°35'30"S, 47°42'00"W, elevation 1175 m) (Scopel et al., 2004). Water-limited yields for a typical local maize cultivar were simulated for 12 sowing dates and for two soil types, representing a scenario of low and high plant-available soil water storage capacity, for two sites: Goiânia (-16°39'S, -49°15'W, elevation 741 m, rain 1660 mm) in the Goiás state and Barreiras (12°09'S, 44°59'W, elevation 452 m, rain 439 mm) in the Bahia state. These sites are representative of the two main subtypes of climate occurring in the Cerrado. The crop growth simulations covered historical climate in the Barreiras site 15years of the 1961-1978 period and in the Goiânia site 17 years of the 1983-2004 periods. Three soil management systems were simulated: maize under conventional tillage (CT), maize under no-tillage with a mulch of residue from the previous maize crop (NT) and maize under no-tillage with a subsequent cover crop (*P. glaucum*) sowed at the end of the rainy season to produce mulch for the next cropping season (NTM). More than 27 000 simulations were run combining climate, years, sowing dates, soil management, rooting depths and options in term germination timing, impact of water stock from one year to another. In this communication we present 15 and 17 years-simulations average results on maize yields, water runoff, and drainage for CT, NT and NTM, with a rooting depth of 90 cm, as a function of 12 sowing dates for these two locations. We show potential sowing windows that obtain >70 % of the maximum yield for each location and <150% of the minimum value of water drainage and runoff for each location.

RESULTS AND DISCUSSION AND CONCLUSION

Simulated crop yields are slightly higher in Goiâna, and with a lower inter-annual variation, for NTM than for CT in both locations (fig.1), NT yields are intermediate. No-tillage systems use more efficiently the seasonal rainfall as a result of reduced simulated surface water run-off. For both locations, model simulations indicate that runoff is reduced to around 5% of the rainfall under NTM and NT, in contrast to 15% under CT (fig.1). As a consequence, the proportion of rainfall lost by drainage is around 10% higher for NT and NTM than for CT (fig.1). NT shows the highest simulated drainage losses because of the low surface water losses without water use by cover crops. This drainage has consequences in term of nutrient losses and ground water pollution (Oliveira et al 2007). Sowing windows are larger in Goiânia than in Barreiras because of higher rainfall. In Goiânia sowing windows to obtain at least 70 % of the maximum yield are similar for the three soil management systems, but only NTM allows to combine acceptable yields (>70% max yield) with low environmental impact (runoff and drainage <150 % minimum). In Barreiras the differences between soil management systems are higher because of a dryer climate. NT allows extending the sowing windows by one month compared to CT while still obtaining an acceptable yield level. For water drainage acceptable sowing dates stretch one month and half with NTM while with NT no sowing date is found to be "acceptable" in terms of drainage. These sets of simulations are a first step in providing Brazilian farmers and insurance companies with an accurate risk analysis of crop production in the Cerrado. In a similar way, STICS can also be used as a tool to provide decision-makers with information on plausible impacts of crop production on the environment.

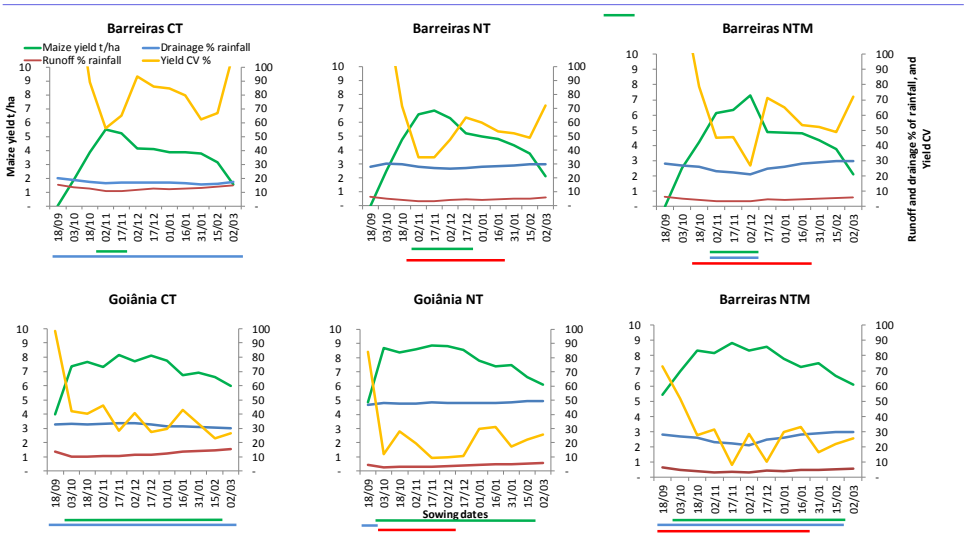


Figure 1 : Average maize yield (t/ha) for the 15 and 17 years simulated, CV of yield (%), average water drainage and runoff as a % of rainfall during the maize cycle, as a function of 16 sowing dates, for two locations (Barreiras, Goiânia) and 3 soil management systems (conventional tillage: CT, no-till without cover crop: NT, no-till with cover crop : NTM). Colored lines represent the optimum sowing windows considering yield, water drainage or runoff.

RÉFÉRENCES

Lal, R. Mulching effects on runoff, soil erosion and crop response on alfisols in western Nigeria, J. Sustain. Agric., v.11, 1998. p135-154.

Oliveira, M.I. L. de; Macena da Silva, F.A. ; Goedert, W.J. ; Vilela, L. ; Becquer, T. 2007. Modelagem do movimento de água e estimativa do potencial de perdas por lixiviação dos íons NO3-, K+, Mg2+ e Ca2+. In: XXXI Congresso brasileiro de ciência do solo, Gramado. cd, 2007.

Resck, D. V. S.; Vasconcellos C. A.; Vilela, L.; Macedo, M. C. M. Impact of conversion of Brasilian cerrados to cropland and pastureland on soil carbon pool and dynamics. In: LAL, J. M. R.; KIMBLE, J. M.; STEWART, B. A. (Ed.). Global climatic change and tropical ecosystems. New York: Lewis Publishers, 2000. p. 169-196.

Scopel E., Silva F.A.M. da, Corbeels M., Affholder F., Maraux F., 2004 – Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. Agronomie, 24, 1-13.

Da Silva, Fernando. Antonio Macena. Parametrização e modelagem do balanço hídrico em sistema de plantio direto no cerrado brasileiro. 2004. 218 p. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

ÉVALUATION DU MODÈLE STICS POUR LA SIMULATION D'UN ENCHAÎNEMENT DE CULTURES ET SON INTÉRÊT DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

EVALUATION OF THE STICS MODEL FOR THE SIMULATION OF A MULTIYEAR CROP SUCCESSION: ITS INTEREST IN A CLIMATE CHANGE CONTEXT.

Sophie Moulin[1,2], Françoise Ruget[2], Albert Olioso[1], Sébastien Garrigues[1,2], André Chanzy[1], Véronique Desfonds[2], Nadine Bertrand[1]

[1] UMR 1114 EMMAH, Inra, 84914 Avignon cedex 9, France ; [2] CEH, Maclean Building, Benson Lane, Crowmarsh Gifford, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK

Mots clés : modèle de culture, changement climatique, succession de cultures, conditions initiales
Keywords : crop modelling, climate change, crop succession, initial conditions

INTRODUCTION

Dans les 50 prochaines années, les ressources en eau et la production végétale seront vraisemblablement fortement affectées par le changement climatique ainsi que par les changements d'occupation du sol. Dans ce contexte, il est important d'être en mesure de modéliser une succession de cultures, mais ceci soulève différentes difficultés : paramétrisation du modèle, enchaînement... Cette problématique a notamment été abordée dans le cadre du projet MACSUR (Kollas et al, 2015) où les auteurs ont montré l'importance d'une bonne connaissance de la quantité d'azote initiale dans le sol.
L'enchaînement des années de simulation semble essentiel en conditions hydriques limitantes où le manque d'eau dans le sol peut se répercuter d'une année sur l'autre. Nous proposons ici d'évaluer la capacité du modèle STICS à simuler une succession de cultures et d'évaluer l'impact des conditions initiales (eau et azote) sur la simulation, dans le but d'appréhender l'intérêt du modèle dans un contexte de changement climatique et en particulier en conditions hydriques limitantes.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Description du site d'étude

Le site SFT du centre d'Avignon offre 10 années (2000-2010) de mesures effectuées sur une parcelle cultivée (Garrigues et al.2015). Les mesures disponibles concernent les caractéristiques de la végétation, les propriétés du sol, des mesures de flux et les pratiques agricoles. La succession de cultures sur le site est la suivante : maïs/blé/tournesol/blé/pois/blé/sorgho/blé/sorgho/blé.

Protocole utilisé

Les simulations des différentes cultures ont été réalisées avec le modèle STICS. Des USMs de sol nu ont été introduites entre les périodes de culture, avec prise en compte du travail du sol.
Afin d'évaluer l'impact des conditions initiales sur les simulations, 3 types de simulation en fonction du type d'initialisation des contenus en eau et azote ont été réalisées.
- simulation Cinit « mesures » : initialisation faite à partir de mesures in-situ et d'expertise
- simulation Cinit « enchaînement » : pas d'initialisation sauf pour la première USM
- simulation Cinit « standard » : initialisation avec des valeurs standard (F. Ruget)

Des règles d'initialisation ont été définies pour l'azote et pour la réserve en eau du sol en fonction du précédent cultural et de la période de l'initialisation.

RÉSULTATS

Biomasse-rendement

La comparaison des simulations aux mesures montre que l'on simule globalement bien la dynamique de la biomasse et le rendement. On note cependant des problèmes de phasage temporel pour le blé et une mauvaise représentation du sorgho (paramétrage).

Impact de l'initialisation : une initialisation standard dégrade les résultats (ou ne change rien) par rapport à une initialisation avec mesures. On note que l'enchaînement des cultures ne dégrade pas ou améliore les résultats (par rapport à l'initialisation « standard » ou « mesures ») dans 9 cas /10. On peut donc remplacer l'expertise annuelle par un enchaînement.

Réserve en eau

La comparaison simulation/mesures montre que la dynamique temporelle est assez bien reproduite (sauf pour 2002 et 2005). La simulation « enchaînement » donne des résultats proches de la simulation « mesures ». Ainsi, l'enchaînement, et donc la méconnaissance des Cinit., ne dégrade pas la simulation.

L'impact des conditions initiales est plus fort lorsque le réservoir n'est pas totalement rempli (la réserve s'épuise plus tôt). De plus, pour les semis d'hiver, une mauvaise initialisation n'est pas pénalisante car la réserve se remplit rapidement (2002, 2004). De même en 2001 où la réserve s'est remplie courant avril.

On note enfin qu'en conditions limitantes, le modèle « consomme » plus d'eau que la quantité mesurée.

Evapotranspiration

On obtient une bonne représentation de la dynamique globale de l'ETR sauf pour 2003 et 2009. En 2003, 2007 et 2009, l'évaporation du sol nul (avant apparition de la culture) est surestimée.

CONCLUSION

Initialisation du modèle : Les résultats montrent qu'il est toujours préférable d'avoir recours à une initialisation « mesures » ou « enchaînement» plutôt que « standard ». L'initialisation par enchaînement permet en outre de s'affranchir de la contrainte liée aux mesures et à l'expertise.

On note également l'importance d'une bonne prise en compte des périodes d'inter-culture. L'enchaînement peut introduire des erreurs si elles sont négligées. Enfin, la simulation «enchaînement » donne une plus grande fiabilité à la spatialisation du modèle que tout autre mode d'initialisation (« standard », « mesures »). Si la précision de l'initialisation a peu d'impact en conditions hydriques non limitantes, elle devient cruciale en conditions sèches.

Limites liées à la modélisation : Malgré des résultats cohérents obtenus sur l'ensemble de la période, la modélisation d'une succession de cultures montre plusieurs limites liées à la modélisation. En particulier, il conviendra à l'avenir de mieux maîtriser le phasage temporel de la biomasse et l'estimation de l'évaporation du sol avant la mise en place du couvert.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy. 18:309*-332.

Garrigues, S., Olioso, A., Calvet, J. C., Martin, E., Lafont, S., Moulin, S., Chanzy, A., Marloie, O., Buis, S., Desfonds, V., Bertrand, N., and Renard, D., 2015, Evaluation of land surface model simulations of evapotranspiration over a 12-year crop succession: impact of soil hydraulic and vegetation properties, Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 3109-3131. doi:10.5194/hess-19-3109-2015

Kollas, C., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Manevski, K., Müller, C., Palosuo, T., Armas-Herrera, C., Beaudoin, N., Bindi, M., Charfeddine, M., Conradt, T., Constantin, J., Eitzinger, J., Ewert, F., Ferrise, R., Gaiser, T., Garcia De Cortazar Atauri, I., Giglio, L., Hlavinka, P., Hoffmann, H., Hoffmann, M. P., Launey, M., Manderscheid, R., Mary, B., Mirschel, W., Moriondo, M., Olesen, J. E., Ozturk, I., Pacholski, A., Ripoche-Wachter, D., Roggero, P. P., Roncossek, S., Rotter, R. P., Ruget, F., Sharif, B., Trnka, M., Ventrella, D., Waha, K., Wegehenkel, M., Weigel, H.-J., Wu, L. (2015). Crop rotation modelling - a European model intercomparison. *European Journal of Agronomy, 70*, 98-111.

UTILISATION DE STICS POUR LA RÉALISATION DE DIAGNOSTICS AGRO-ENVIRONNEMENTAUX

ESTIMATION DES POTENTIELS DE RENDEMENTS ET DES ÉCARTS AUX RENDEMENTS POTENTIELS POUR DIFFÉRENTES CULTURES DANS LE GRAND OUEST GRÂCE AU MODÈLE STICS

ASSESSMENT OF POTENTIAL YIELDS AND YIELD GAPS IN THE WEST OF FRANCE WITH THE STICS CROP MODEL

Eléonore Schnebelin[1], Olivier Godinot[2]

[1] AgroParisTech, Paris, France ; [2]UMR SAS, Agrocampus Ouest, Inra, Rennes, France

Mots clés : modélisation, rendement potentiel, écart de rendement, territoire
Keywords : modeling, potential yield, yield gap, landscape

INTRODUCTION

Le Grand-Ouest est la plus importante région d'élevage de France. Cette région importe une grande partie des matières premières riches en protéines consommées par les animaux. De nombreux programmes visent une augmentation de l'autonomie protéique de ce territoire. Le « water-limited yield » (Yw) est le rendement maximal d'une culture dans un environnement donné, avec des nutriments en quantité suffisante et sans stress biotique mais en tenant compte de la quantité d'eau réelle disponible, ce qui en fait une référence adaptée aux cultures non irriguées (Fischer, 2015; Van Ittersum et al., 2013). L'estimation de Yw pour différentes cultures est utile pour déterminer les zones où il seraitintéressant de les développer en priorité. De plus, la comparaison entre rendements potentiels limités par l'eau et rendements observés permet de calculer l'écart au rendement potentiel (appelé yield gap, YG), ce qui fournit une estimation des marges de progrès techniques.Le calcul de YGpermet en outre de tester des scénarios d'augmentation de la production végétale à l'échelle du territoire.L'utilisation de modèles de croissance des plantes apparaît comme un bon moyen d'estimer les rendements potentiels, malgré les limites inhérentes aux modèles et aux données (Van Ittersum et al., 2013).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Notre choix s'est porté sur le modèle STICS pour la diversité des cultures qu'il peut simuler, pour sa robustesse ainsi que pour ses capacités à modéliser les cultures à l'échelle régionale (Coucheney et al., 2015). Les données de sol utilisées sont issues de la « European Soil Database »(European Commission, 2016). Les données climatiques sont des données Météo France issues du modèle Safran-Isba-Modcou (SIM), à une maille de 8km. Des itinéraires techniques représentatifs des pratiques dominantes ont été fournis par des techniciens d'instituts techniques et de coopératives. Faute de données de terrain pour la calibration, nous avons utilisé les valeurs par défaut du modèle STICS pour toutes les cultures sauf le maïs, pour lequel une variété de précocité adaptée au Grand Ouest a été choisie. Les stress liés à l'alimentation azotée ont été neutralisés grâce à une option du modèle.
Les simulations ont été réalisées sur trois années contrastées (2012 à 2014), pour chaque type de sol associé à ses points météo, pour les cultures de maïs, blé d'hiver, pois protéagineux de printemps, colza et luzerne. Les résultats ont été traités avec le système d'information géographique QGIS, ce qui a permis de réaliser des cartes de résultats par unité de sol, qui peuvent ensuite être agrégées par canton, par petite région agricole et par département. Les rendements réels par département ont permis de calculer les YG.

RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Les cartes de Yw par unité de sol(Figure 1) permettent de caractériser finement le rendement potentiel des cultures, et d'identifier les zones les plus productives pour chaque culture. Il n'existe pas d'observations de terrain à cette échelle permettant de confronter les résultats du modèle à la réalité. On constate cependant que nos résultats pour le maïs ensilage concordent avec les valeurs maximales des essais d'Arvalis (Arvalis, 2011). On note également une forte variabilité des potentiels de rendement selon de l'année (Figure 1).

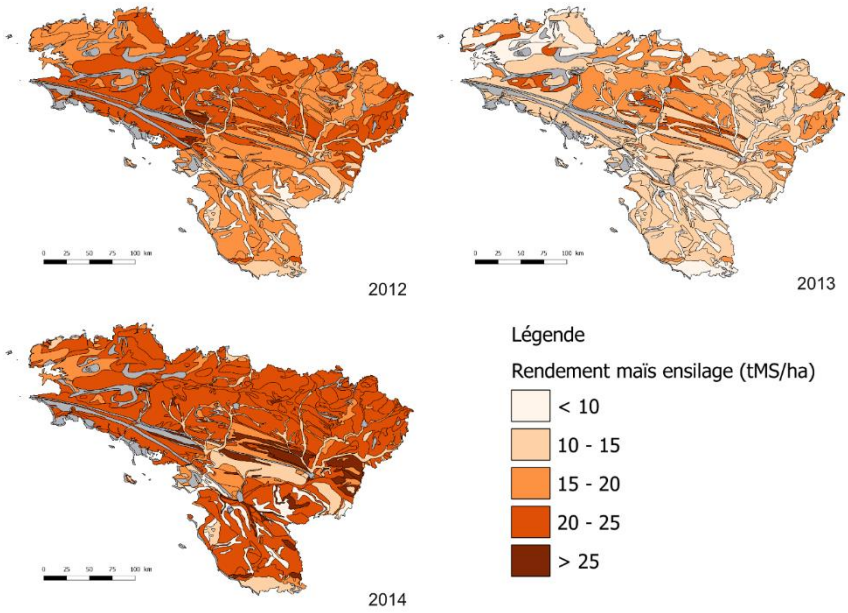


Figure 1 : rendement potentiel (Yw) du maïs ensilage par unité de sol du Grand Ouest entre 2012 et 2014

A partir du rendement réel départemental et du Yw modélisé, on peut calculer leyield ratio (YR = rendement réel / Yw). On considère souvent que le rendement atteignable en conditions réelles est proche de 80% du rendement potentiel limité par l'eau (van Ittersum et al., 2013). Les valeurs de YR varient peu entre départements pour une culture donnée, ce qui peut s'expliquer par une technicité similaire des agriculteurs des différents départements. En revanche, ils varient de manière plus importante selon les cultures : 77% pour le maïs ensilage, mais moins de 60% pour la luzerne et le colza. Ce différentiel pourrait s'expliquer par une sensibilité plus forte de ces cultures aux maladies, une moins bonne maîtrise technique des agriculteurs ou une surestimation des rendements potentiels liée à l'absence de calibration de la culture au contexte régional.

La réduction du YG offre des perspectives d'augmentation de l'autonomie protéique du Grand Ouest. Une amélioration des rendements à hauteur de 80% de Yw pour les cinq cultures étudiées permettrait ainsi de produire 183 000 t de matières azotées totales (MAT) supplémentaires par an à l'échelle du Grand Ouest, ce qui correspond à 15% des MAT importées sous forme de tourteau de soja. Une substitution de 10% des surfaces de maïs par de la luzerne et de 10% du blé par du pois permettrait un gain additionnel de 144 000 t de MAT, soit 12% du soja importé. Ces premières estimations montrent clairement que des marges de manœuvre existent pour améliorer l'autonomie protéique du Grand Ouest par une meilleure maîtrise technique des cultures et des modifications de l'assolement. Toutefois, il paraît impossible d'atteindre une autonomie protéique régionale élevée sans réduction du cheptel. L'atteinte du rendement potentiel nécessite par ailleurs de maîtriser parfaitement tous les stress biotiques, ce qui est probablement hasardeux sur le plan environnemental et sub-optimal sur le plan économique.

La méthodologie utilisée ici est facilement reproductible, et il serait intéressant d'élargir ce travail à d'autres régions. Il est toutefois indispensable de comparer ces résultats avec des données de terrain, pour s'assurer de la bonne calibration du modèle pour les différentes espèces et les différents contextes pédoclimatiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arvalis, 2011.Les territoires du maïs fourrage en France. Arvalis Infos, 8p.

Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., García de Cortázar-Atauri, I., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K.S., Le Bas, C., Justes, E., Léonard, J., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for

plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environ. Model. Softw. 64, 177–190. doi:10.1016/j.envsoft.2014.11.024

European Commission, Joint Research Centre, 2016. European Soil Data Centre. http://esdac.jrc.ec.europa.eu (consulté le 11.10.16).

Fischer, R.A., 2015. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. Field Crops Res., SI:Yield potential 182, 9–18. doi:10.1016/j.fcr.2014.12.006

Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. Field Crops Res. 143, 4–17. doi:10.1016/j.fcr.2012.09.009

DANS QUELLE MESURE L'EXPORTATION D'AZOTE PAR LES PRAIRIES FRANÇAISES PEUT-ELLE ATTÉNUER LES POLLUTIONS AZOTÉES ?

IN WHAT EXTENT CAN NITROGEN EXPORTATION BY GRASSLANDS MITIGATE NITROGEN POLLUTIONS IN FRANCE?

Anne-Isabelle Graux[1], Rémi Resmond[1], Eric Casellas[2], Luc Delaby[1], Rémy Delagarde[1], Michel Duru[3], Philippe Faverdin[1], Christine Le Bas[4], Anne Meillet[5], Hélène Raynal[2], Dominique Ripoche[6], Françoise Ruget[7], Thomas Poméon[5], Olivier Thérond[8], Françoise Vertès[9], Jean-Louis Peyraud[1]

[1]Inra - UMR1348, Agrocampus Ouest, PEGASE, F-35590 Saint-Gilles, France ; [2]Inra - UR0875, MIAT, F-31326 Castanet-Tolosan ; [3]Inra - UR0875, MIAT, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; [4]Inra - US 1106, INFOSOL, F- Orléans, France ; [5]Inra-*US0685 ODR*, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; [6]Inra - US1116, AGROCLIM, F-84914 Avignon, France ; [7]Inra - UMR1114, EMMAH, F-84914 Avignon ; [8]Inra - UR1132 LAE, F-68021 Colmar, France ; [9]Inra - UMR 1069, Agrocampus Ouest, SAS, F-35000 Rennes

Mots clés : prairie, directive nitrate, croissance, exportation d'azote, lixiviation
Keywords : grassland, nitrate directive, growth, nitrogen exportation, lixiviation

INTRODUCTION

La directive « nitrates » a pour objectif de réduire et/ou prévenir les pollutions des eaux causées par les nitrates d'origine agricole. Elle se traduit par la mise en place de mesures dans des zones jugées vulnérables (70% de la SAU en 2015). La directive fixe notamment un plafond de 170 kg d'azote organique épandable par ha de SAU, incluant les déjections des animaux au pâturage. Les valeurs d'excrétion d'azote par les vaches laitières utilisées pour la quantification de l'azote organique épandable à l'échelle de l'exploitation ont récemment été revues à la hausse, rendant difficile, pour certains systèmes très herbagers, le respect de la limite d'épandage. Cependant, l'aptitude des prairies à exporter l'azote pourrait permettre de justifier, dans certains cas, d'une dérogation à ce plafond de 170 kg. Cette étude vise à identifier les combinaisons de pratiques/sol/climat pour lesquelles l'exportation d'azote par les prairies pourrait permettre d'intensifier la fertilisation organique sans dégrader la qualité de l'eau.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Une analyse préliminaire des données terrain (réseaux de suivi de la pousse de l'herbe, dispositifs expérimentaux) a permis d'estimer l'exportation d'azote par les prairies dans certaines régions. Afin d'étendre ces premiers résultats, le modèle STICS (Brisson et al., 1998, 2002, 2003) a été amélioré pour prendre en compte les restitutions animales au pâturage puis utilisé pour simuler, de 1984 à 2013, le fonctionnement des prairies françaises. L'information climatique a été fournie par le système SAFRAN de Météo France. L'information liée au sol provient de la base de données géographique des sols de France au 1/1 000 000 et d'une estimation spécifique de la teneur en carbone organique des sols. Les simulations ont été réalisées à l'échelle de 15120 unités pédoclimatiques (UPC), issues du croisement de la résolution de l'information climatique et pédologique, et pour lesquelles la surface de prairies est significative. Quatre types de prairies ont été considérés, correspondants à des prairies permanentes ou semées (graminées pures, en mélange avec des légumineuses, ou légumineuses pures). Un unique paramétrage a été utilisé pour simuler les graminées d'une part et les légumineuses d'autre part. La proportion et la durée d'implantation des prairies au sein de chaque UPC ont été estimées sur la base de l'information issue du registre parcellaire graphique et du recensement agricole de 2010. Les pratiques agricoles ont été résumées sous la forme de 30 modes d'exploitation dérivés du projet ISOP (Ruget et al., 2006) : la proportion de ces modes est connue pour chacun des types de prairie présents à l'échelle de la région fourragère. Les simulations (173 260 séries de 30 ans) ont été

réalisées par la plateforme de modélisation RECORD (Bergez et al., 2014) de l'INRA. Des résultats sont disponibles à l'année, au mois et/ou à la récolte et seront bientôt disponibles pour certaines variables à la journée. Les principales variables d'intérêt concernent l'azote apporté par fertilisation, par les restitutions animales et/ou par fixation symbiotique, la disponibilité en eau et en azote du sol, les rendements, la concentration en protéines des fourrages, l'exportation d'azote, le drainage, la lixiviation des nitrates et leur concentration dans les eaux drainées.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les pratiques agricoles simulées par le modèle sont cohérentes avec les statistiques agricoles et la littérature. Le modèle reproduit de façon satisfaisante la dynamique et l'ordre de grandeur de la croissance dans les régions Bretagne et Pays de la Loire, mais a tendance à surestimer la croissance observée en Franche-Comté et en Auvergne. Les simulations confirment l'analyse des données terrain : sur 30 ans, les prairies produisent en moyenne 9 ± 2,5 t MS/ha/an d'une herbe contenant en moyenne 15,3 ± 1,4 % de protéines totales. Elles peuvent exporter jusqu'à 423 kg N/ha/an. Les régions Bretagne, Pays de la Loire, Nord-Pas-de-Calais, Picardie et Limousin sont celles qui présentent les plus forts niveaux d'exportation en azote (Figure 1). Les régions Bretagne et Franche-Comté présentent les plus forts niveaux de lixiviation de nitrates (Figure 2). Un entrepôt de données multidimensionnel a été construit afin de stocker le jeu de données simulé et de faciliter l'exploration et l'analyse des sorties de simulation. Des modèles statistiques simples seront construits permettant d'estimer les variables d'intérêt en fonction d'indicateurs accessibles sur le terrain et représentatifs des conditions pédoclimatiques, des pratiques et du type de prairie. A l'échelle des systèmes d'élevage, l'azote organique épandable par hectare de SAU pourra être quantifié pour une typologie de systèmes et mis en relation avec l'exportation d'azote permise par les surfaces en herbe.

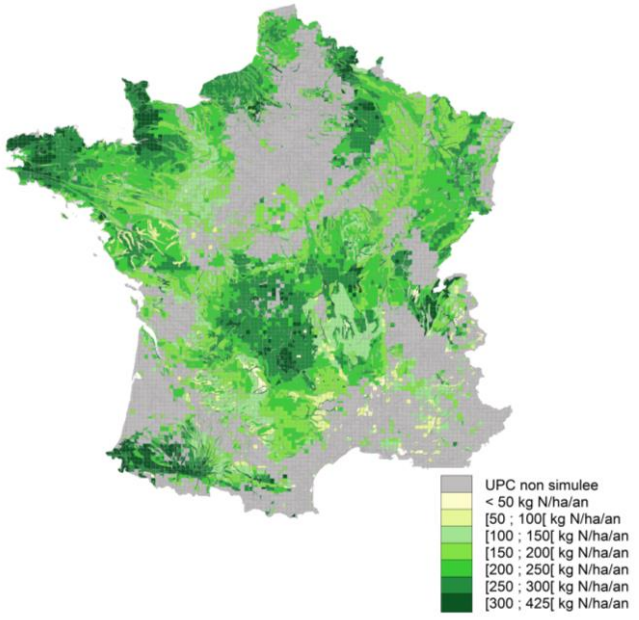


Figure 1 : Quantités annuelles d'azote exporté par les prairies (moyenne des cumuls annuels de 1984 à 2013)

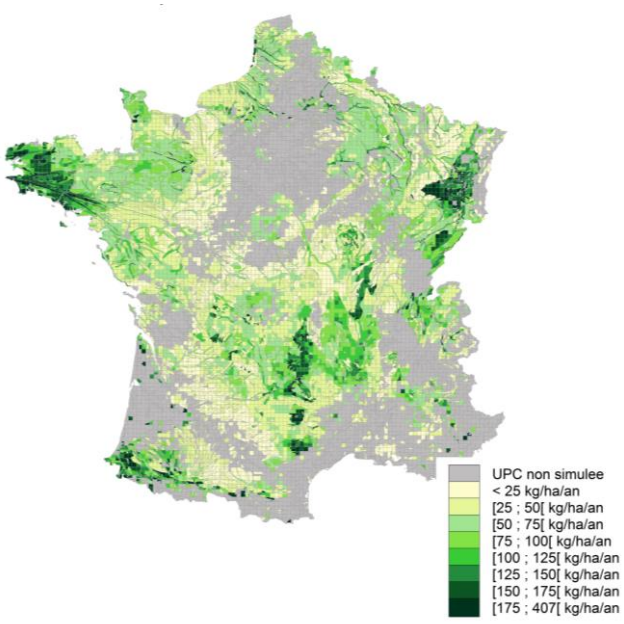


Figure 2 : Lixiviation annuelle des nitrates sous prairie (moyenne des cumuls annuels de 1984 à 2013)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

Brisson N.,Ruget F.,Gate P., Lorgeou J., 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 wheat and corn. *Agronomie*, *22*, 69-93.

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., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309-332.

Ruget, F., Novak, S. et al. (2006). Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, 186, 241-256

Bergez, J.E., Raynal, H., Launay, M., Beaudoin, N., Casellas, E., Caubel, J., Chabrier, P., Coucheney, E., Dury, J., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Justes, E., Mary, B., Ripoche, D., Ruget, F., 2014. Evolution of the STICS crop model to tackle new environmental issues: new formalisms and integration in the modelling and simulation platform RECORD. Environ. Modell. Softw. 62, 370–384, http://dx. doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.010

SIMULER LA PRODUCTION DE BIOMASSE ET LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CULTURES PÉRENNES AVEC LE MODÈLE STICS

MODELLING PRODUCTION AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PERENNIAL CROPPING SYSTEMS WITH THE STICS MODEL

Loïc Strullu[1,2], Fabien Ferchaud[2], Bruno Mary[1], Gaëtan Louarn[1], Nicolas Beaudoin[2]

[1] URP3F, Inra, 86600 Lusignan, France ; [2] UR 1158 AgroImpact, Inra, 02000 Barenton-Bugny, France

Mots clés : carbone organique du sol, azote organique du sol, cultures pérennes
Keywords : soil organic carbon, soil organic nitrogen, perennial crops

INTRODUCTION

Le septième programme d'action pour l'environnement de la Commission européenne engage l'Union européenne à "accroître ses efforts pour réduire l'érosion des sols et augmenter la matière organique". L'utilisation de cultures pérennes dans la rotation des cultures pourrait être un moyen de réaliser cet objectif. Les cultures vivaces diffèrent des cultures annuelles en raison de leur capacité à recycler le carbone (C) et l'azote (N) d'une année à l'autre. Elles pourraient également augmenter le stockage de C et N dans les sols en raison de la mort des organes pérennes et du « turn-over » du système racinaire. Nous avons récemment amélioré le modèle STICS pour permettre la simulation à long terme de systèmes de culture pérenne, en harmonie avec son objectif de généricité pour les cultures (Brisson et al., 1998 ; 2008). Nous avons ajouté au modèle de nouveaux formalismes permettant la simulation des flux de C et N entre les organes pérennes et non pérennes (Strullu et al., 2014) et la simulation du « turn-over » du système racinaire en distinguant les racines fines et grosses (Strullu et al., 2015).

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Après calibration du modèle sur des expérimentations réalisées à Estrées-Mons de 2006 à 2015 (France – 80), la simulation de l'évolution des stocks de C et N organiques dans le sol a été réalisée sur une expérimentation de long terme réalisée à Rothamsted (UK). Il s'agit d'une culture de *Miscanthus* x *giganteus* installée depuis 20 ans, comparant l'effet de trois niveaux de fertilisation azotée (Roth0 = 0 kg N ha^{-1} a^{-1} ; Roth60 = 60 kg N ha^{-1} a^{-1} ; Roth120 = 120 kg N ha^{-1} a^{-1}). Des mesures des stocks de C et N organiques dans le sol (SOC et SON respectivement) ont été réalisées régulièrement depuis le début de l'expérimentation. Ces données nous ont permis de valider les simulations du modèle. Nous avons ensuite réalisé une analyse de sensibilité de l'évolution de SOC, SON et de N minéral dans le sol aux entrées C et N en faisant varier la quantité et la qualité des résidus de culture (mulch, rhizomes morts, turn-over racinaire).

RÉSULTATS

La prise en compte des entrées de C et N dans le sol dues aux résidus de cultures, a permis une simulation réaliste de l'évolution du carbone et de l'azote organique du sol (Figure 1). Les résultats mettent en évidence le rôle primordial du « turn-over » des racines et des organes pérennes sur le stockage C et N dans le sol en plus de la dégradation des résidus aériens qui forment un mulch à la surface du sol (Figure 2).

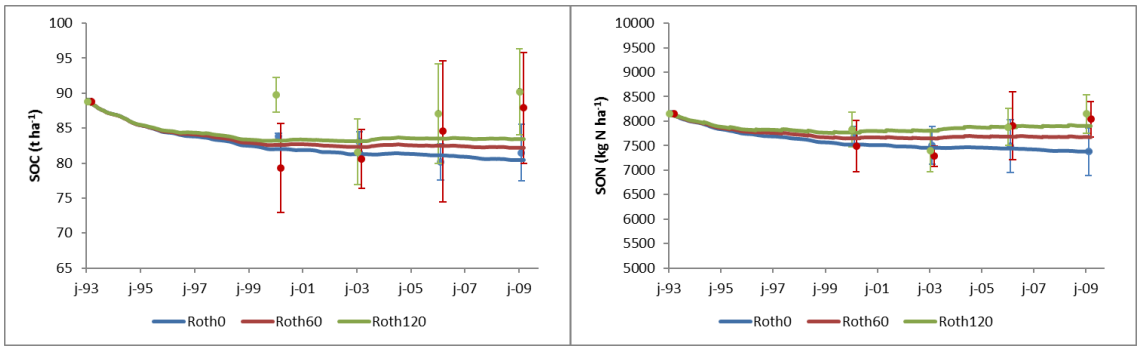


Figure 1 : Simulation de l'évolution des stocks de C & N organiques dans le sol.

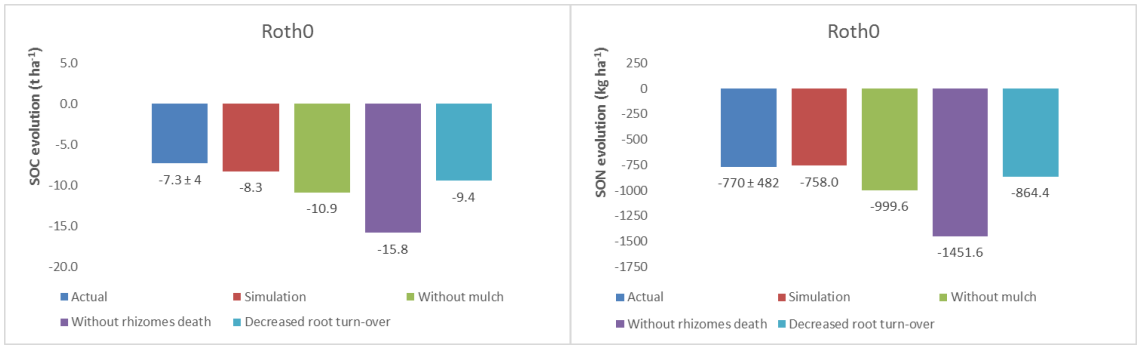


Figure 2 : Evolution des stocks de C & N organiques dans le sol pour le traitement Roth0 en fonction de la quantité et de la qualité des résidus de culture retournant au sol.

CONCLUSIONS

Les améliorations apportées au modèle permettent la simulation sur le long terme de la production de biomasse des cultures pérennes et de leurs impacts environnementaux. Ces modifications seront également utiles pour simuler les systèmes de culture innovants développés pour l'agriculture biologique, en permettant une meilleure prise en compte des flux de C&N liés à l'introduction de cultures pérennes dans les SDC (luzerne, prairies).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy MH., 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 JM., Meynard JM., Delecolle R. 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18(5–6):311–346.

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N. 2008 – Conceptual basis, formalisations and parameterization of the stics crop model. Quae, Versailles

Strullu L., Beaudoin N., Garcia de Cortazar-Atauri I., Mary B. 2014 - Simulation of biomass and nitrogen dynamics in perennial organs and shoots of *Miscanthus* × *giganteus* using the STICS model. BERE. DOI:10.1007/s12155-014-9462-4

Strullu L., Ferchaud F., Yates N., Shield I., Beaudoin N., de Cortàzar Atauri I.G., Besnard A., Mary B. 2015 - Multisite Yield Gap Analysis of Miscanthus × giganteus Using the STICS Model. BERE. DOI 10.1007/s12155-015-9625-y

NOUVEAUX FORMALISMES, PARAMÉTRAGES ET EXTENSION DU DOMAINE DE VALIDITÉ DE STICS

ÉLÉMENTS DE RÉFLEXION SUR L'INTRODUCTION D'UN MODULE P DANS LE MODÈLE STICS

WHAT DO WE NEED TO IMPLEMENT A P MODULE IN STICS?

4

Alain Mollier[1], Anne Budynek-Gallet[1], Pascal Denoroy[1], Marko Kavic[1], Christian Morel[1], Sylvain Pellerin[1], Bruno Ringeval[1], Isabelle Bertrand[2], Frédérique Gérard[2], Philippe Hinsinger[2], Claire Jouany[3], Sokrat Sinaj

[1] Inra, UMR ISPA, Villenave d'Ornon, France ; [2] Inra, UMR ECO&SOLS, Montpellier, France ; [3] Inra, UMR AGIR, Toulouse, France ; [4] Agroscope Changins-Wädenswil, Nyon, Switzerland

Mots clés : phosphore, nutrition minérale, grandes cultures, modèle, STICS
Keywords : phosphorus, mineral nutrition, crops, model, STICS

La gestion de la nutrition phosphatée des cultures est une problématique importante en agriculture. Le phosphore (P) est un élément nutritif indispensable aux végétaux et non substituable. Le phosphore est souvent le nutriment le moins disponible dans le sol en raison de ses fortes interactions avec les constituants du sol et de la faible solubilité des minéraux phosphatés. A l'échelle globale, 30-40% des terres arables sont considérées limitées par la biodisponibilité en P (Ringeval et al., 2017). Dans les agroécosystèmes cultivés les exportations répétées de P par les récoltes conduisent à une baisse de sa disponibilité dans les sols. Des apports de fertilisants phosphatés inorganiques ou organiques est la principale stratégie pour pallier la faible disponibilité du P dans les sols. D'un point de vue environnemental, le phosphore est un facteur déclencheur de l'eutrophisation des eaux continentales. D'un point de vue économique, le phosphore est une ressource limitée et sujet à des tensions socio-économiques.

Actuellement, le raisonnement de la fertilisation phosphatée reste basé sur des relations empiriques entre un indicateur de la disponibilité en P du sol (extraction chimique) et un indice de rendement obtenues sur des essais de long terme de fertilisation P. Ces relations sont souvent lâches, très variables et difficilement transposables dans divers contextes pédoclimatiques.

De nombreux travaux ont été conduits sur la disponibilité en P du sol (Hinsinger, 1998; Ziadi et al., 2013), sur les processus d'acquisition du P (Lambers and Plaxton, 2015) et la réponse à P des cultures (Li et al., 2016; Mollier and Pellerin, 1999; Plenet et al., 2000a, 2000b). Contrairement à l'azote, peu de modèles de culture intègrent explicitement les processus liés au P sur le continuum sol-plante. La complexité de la biogéochimie du P, l'importance de l'architecture et de la morphologie racinaire et des symbioses, la formulation de la demande en P des cultures sont entre autres autant de raisons qui peuvent expliquer ce décalage entre N et P dans les modèles.

Les objectifs de cette communication sont de faire un rapide état des lieux des connaissances sur le transfert sol-plante du P, d'évaluer les possibilités d'inclure un module P dans STICS par analogie à N. Ce module P devra simuler la disponibilité du P le long du profil de sol, la demande en P de la culture, le prélèvement racinaire et la réponse de la culture. Un des enjeux est de proposer des formalismes simples compatibles avec STICS, mais suffisamment robustes pour représenter la complexité de la biogéochimie du P. A partir des connaissances et des modèles existants de transfert sol-plante du P à l'échelle du peuplement, nous proposerons différentes stratégies de formalisation qui seront discutées avec la communauté STICS. En complément, la synthèse des jeux de données disponibles à la fois sur la disponibilité en P des sols et la composition en P des différentes cultures permettra d'évaluer les possibilités d'établir des références P pour le nouveau module P de STICS et d'identifier les données complémentaires à acquérir ainsi que les opportunités pour tester le nouveau module au champ.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Hinsinger, P., 1998 - How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. Advances in Agronomy 64, 225–265.

Lambers, H., Plaxton, W.C., 2015 - Phosphorus: Back to the Roots, in: Annual Plant Reviews Volume 48. John Wiley & Sons, Inc., pp. 1–22.

Li, H., Mollier, A., Ziadi, N., Shi, Y., Parent, L.-É., Morel, C., 2016 - The long-term effects of tillage practice and phosphorus fertilization on the distribution and morphology of corn root. Plant and Soil 412 (1-2), 97-114

Mollier, A., Pellerin, S., 1999 - Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. Journal of Experimental Botany 50, 487–497.

Plenet, D., Etchebest, S., Mollier, A., Pellerin, S., 2000a - Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency - I. Leaf growth. Plant Soil Plant Soil 223, 117–130.

Plenet, D., Mollier, A., Pellerin, S., 2000b - Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. Plant Soil Plant Soil 224, 259–272.

Ringeval, B., Augusto, L., Monod, H., van Apeldoorn, D., Bouwman, L., Yang, X., Achat, D.L., Chini, L.P., Van Oost, K., Guenet, B., Wang, R., Decharme, B., Nesme, T., Pellerin, S., 2017 - Phosphorus in agricultural soils: drivers of its distribution at the global scale. Global Change Biology 23(8), 3418-3432

Ziadi, N., Whalen, J.K., Messiga, A.J., Morel, C., 2013 - Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems. Adv Agron 122, 85–126.

ADAPTATION, PARAMÉTRAGE ET GÉNÉRICITÉ DU MODÈLE STICS APPLIQUÉ À L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE

ADAPTATION, PARAMETRIZATION AND GENERICITY OF THE STICS MODEL APPLIED TO ORGANIC FARMING

Florent Chlébowski[1], Loïc Strullu[2], Bruno Mary[1], Loïc Prieur[3], Baptiste Soenen[4], Anne-Laure de Cordoue[4], Bernard Rolland[5], Nicolas Beaudoin[1]

[1] Inra, UR 1158 AgroImpact, 02000 Barenton-Bugny, France ; [2] Inra, UR P3F, 86600 Lusignan, France ; [3] CREAB Midi-Pyrénées, 32020 Auch Cedex, France ; [4] ARVALIS - Institut du Végétal, France ; [5] Inra, UMR 1349 IGEPP-MVI, 35653 Le Rheu, France

Mots clés : Agriculture biologique, paramétrage, céréales, légumineuses, généricité du modèle
Keywords : Organic farming, parametrization, cereals, legumes, model genericity

INTRODUCTION

L'agriculture biologique (AB) s'appuie sur la diversification des rotations culturales (légumineuses, variétés robustes...) et a recours aux engrais organiques pour s'affranchir des produits de synthèse. Quels sont ses impacts sur les bilans d'eau, d'azote et de carbone ? Le projet ENBIOexpé vise à comprendre et à modéliser le rôle de leurs déterminants en systèmes AB de grande culture. Adapter STICS aux situations AB est un challenge scientifique et technique. Scientifique sur les questions de la pression des bio-agresseurs et du devenir de l'azote. D'ingénierie sur la minéralisation des produits résiduaires organiques (PRO) et sur la calibration de nouvelles espèces et variétés. Notre hypothèse est que STICS peut être appliqué en AB sans changer les paramètres globaux calibrés en agriculture conventionnelle (AC), mais uniquement en adaptant la typologie des PRO (non présenté dans ce résumé) et les paramètres variétaux si les bio-agresseurs (adventices, maladies et ravageurs) y sont suffisamment maîtrisés. Un postulat est que, si le turn-over de l'azote se différenciait entre AB et AC, il ne serait perceptible qu'à long terme (Thèse de B. Autret, 2017). Les plantes candidates de ce projet sont : le blé d'hiver, l'orge de printemps, l'escourgeon, le triticale, la féverole d'hiver et le trèfle violet (Rapport de Chlébowski *et al.*, 2017).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La version de STICS utilisée est une version de recherche dite « réserves » dans laquelle la compartimentation de l'azote entre parties aériennes et souterraines est simulée de façon dynamique (Strullu *et al.*, 2015). Elle explicite la répartition et la compétition à l'azote entre organes ; compétition d'autant plus cruciale pour des systèmes où l'azote est plus limitant, comme en AB.
L'utilisation de cette version de recherche a nécessité le paramétrage du profil racinaire, en activant l'option « *trophic-linked production* » liant la production racinaire à la biomasse aérienne (Baret *et al.*, 1992). Dans ce cadre, un paramétrage (blé) ou une adaptation (féverole) des fichiers plante a été réalisé, de façon à ce que ce travail soit généralisable autant en AB qu'en AC.
Les jeux de données de calibration avec une faible pression biotique ont été sélectionnés. La calibration a priorisé l'emploi de références bibliographiques, suivie d'une optimisation par essai-erreur du fait du faible nombre d'USM disponibles. Ils incluent un grand nombre de variables telles la matière sèche aérienne (MSa), la quantité d'azote des parties aériennes et l'azote minéral du sol.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le paramétrage de STICS en AB donne de très bons résultats sur les paramètres plantes y compris réappliqué en AC (Figure 1), et ce, également pour l'azote dans le sol en AB (Figure 2). Il est également possible par cette méthode, de calibrer de nouvelles plantes, telle la féverole (Figure 3).

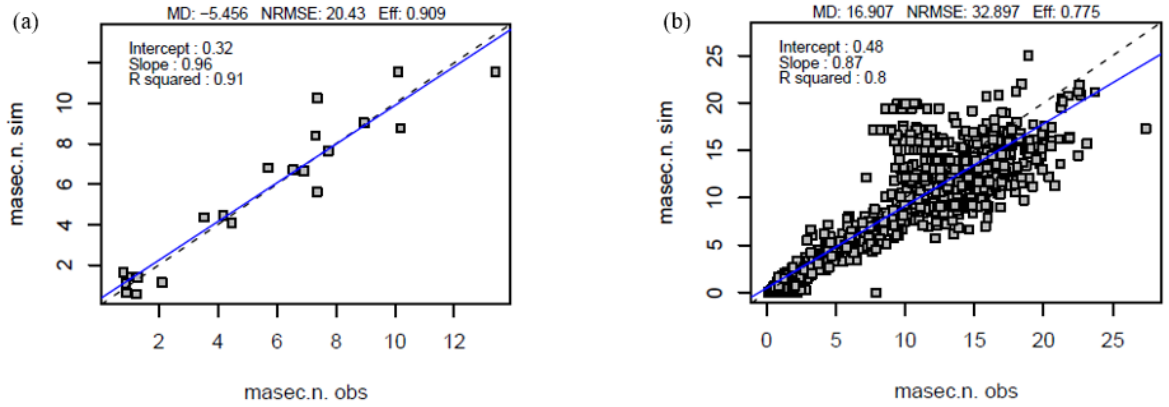


Figure 1 : Comparaison entre observations et simulations de la MSa en t MS.ha^{-1} sur des données blé d'hiver (a) de calibration en AB et (b) de validation - issues de la base SMS de STICS - en AC

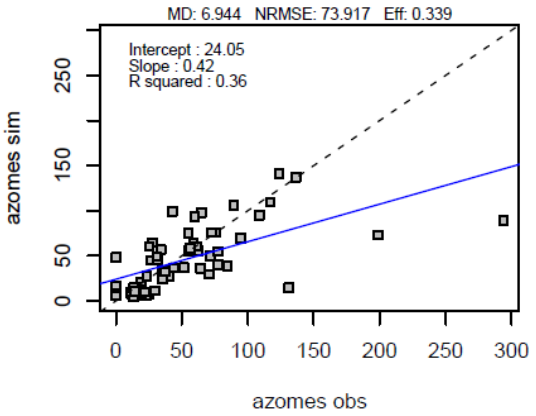


Figure 2 : Comparaison entre observations et simulations de la quantité de nitrate en kg.ha^{-1} sur des données de validation AB de blé d'hiver

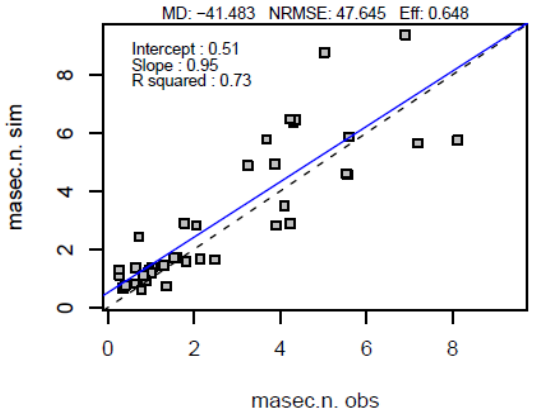


Figure 3 : Comparaison entre observations et simulations de la MSa en t MS.ha^{-1} sur des données de calibration AB de féverole d'hiver

Ces résultats démontrent la capacité du modèle STICS à simuler des essais conduits en AB et ses spécificités sous la condition que les données choisies soient sans ou avec peu de pression biotique. Cela tant pour des céréales que pour des légumineuses. De plus, ce paramétrage des fichiers plante en AB est directement applicable à des situations en AC en adaptant les paramètres variétaux.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail souligne la bonne généricité du modèle qui permet, *via* la version de recherche utilisée, de travailler aussi bien en modalité AB que AC. Il permet la démarche de « yield gap analysis », en comparant les rendements potentiels et réels en situation AB où les pressions biotiques sont présentes (Rakotovololona *et al.*, ce colloque). Enfin, ce travail renouvelle le questionnement sur la calibration actuelle en AC et renforce l'intérêt des métadonnées informant de l'état sanitaire des cultures (projet IDE-STICS).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Autret, Bénédicte. « Long term quantification and modelling of carbon and nitrogen fate in alternative cropping systems experiments ». AgroParisTech, 2017.

Baret, F., A. Olioso, et J. L. Luciani. 1992. « Root Biomass Fraction as a Function of Growth Degree Days in Wheat ». Plant and Soil 140 (1): 137 44. doi:10.1007/BF00012815

Chlébowski, et al. « Paramétrage, adaptation et généricité du modèle STICS en agriculture biologique ». INRA, 2017.

Strullu, L., F. Ferchaud, N. Yates, I. Shield, N. Beaudoin, I. Garcia de Cortazar-Atauri, A. Besnard, et B. Mary. 2015. « Multisite Yield Gap Analysis of Miscanthus × Giganteus Using the STICS Model ». BioEnergy Research 8 (4): 1735‑49. doi:10.1007/s12155-015-9625-y.

IMPACT DE LA MODIFICATION DES FORMALISMES DE RÉPONSE À LA TEMPÉRATURE SUR LES PROJECTIONS FUTURES DE PRODUCTION FOURRAGÈRE DU MODÈLE STICS

IMPACT OF CHANGING TEMPERATURE RESPONSE FORMALISMS ON FORAGE PRODUCTION PROJECTIONS IN FUTURE CLIMATES WITH THE STICS MODEL

Serge Zaka[1], Gaëtan Louarn[1]

[1] Inra UR4 P3F, F86600 Lusignan, France

Mots clés : température, luzerne, fétuque élevée, changement climatique, courbe de réponse, croissance, développement, production fourragère
Keywords : temperature, alfalfa, tall fescue, climate change, response curve, growth, development, forage production

INTRODUCTION

Dans un contexte de changement climatique où les gammes de températures rencontrées par les cultures pourraient s'élargir (i.e. projections montrant une plus forte augmentation des températures chaudes que des températures froides en France), la prise en compte dans les modèles de culture de réponses à la température non linéaires et couvrant un large domaine thermique pourrait devenir un impératif. Dans STICS, l'analyse de sensibilité du modèle bi-linéaire actuellement utilisé a révélé que les réponses à la température du développement et de la croissance étaient les plus sensibles à un changement de régime thermique, et que le poids relatif de certains paramètres dans ces réponses (température optimale) devrait s'accroître dans la période estivale, critique pour la production fourragère (Zaka, 2016). L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact d'une modification du formalisme de réponse à la température du développement et de la croissance foliaire dans le modèle STICS sur les prédictions de rendement fourrager en climat actuel et dans des climats futurs projetés. Il s'agira notamment de préciser la pertinence de modifications du formalisme des courbes de réponses non linéaires et du pas de temps d'intégration des effets (horaire/journalier).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Trois modèles comportant différents formalismes de réponse à la température ont été comparés sur la base des unités de simulation du projet CLIMATOR (séries climatiques : présent : 1970-2000 ; futur proche : 2020-2050 ; futur lointain 2070-2100 ; Brisson and Levrault, 2010) : i) la version standard dite « linéaire » avec un pas de temps journalier d'intégration, ii) une version utilisant un formalisme non linéaire de réponse dit courbe « bêta » avec un pas de temps d'intégration inchangé et enfin iii) une version intégrant la courbe bêta mais l'intégrant sur un pas de temps horaire. L'exercice de simulation a été réalisé pour deux sites contrastés (Lusignan : climat tempéré océanique ; Avignon : climat Méditerranéen) et pour deux espèces fourragères présentant des optimums thermiques différents, la luzerne et la fétuque élevée (Zaka et al., 2017).

RÉSULTATS

Dans tous les cas de figures, et plus particulièrement pour la fétuques (espèce avec l'optimum thermique le plus bas) à Avignon (climat le plus chaud), un changement du formalisme non linéaire de réponse à la température s'est révélé avoir un impact marqué sur le cumul du temps thermique et l'avancement des stades phénologiques dans les différents climats testés (Fig. 1 A,C). Ces changements étaient plus marqués avec le modèle « beta horaire » intégrant les fluctuations journalières de température. Toutefois, les répercutions des changements de phénologie sur le développement végétatif du couvert (Fig. 1 B,D ; < 0.75 $m^2.m^{-2}$), l'interception du rayonnement et *in*

fine la production fourragère prédites par le modèle ont toujours été très limités. Au total, les trois modèles aboutissent aux mêmes conclusions d'impact du changement climatique sur la production fourragère et confirment les résultats du projet CLIMATOR.

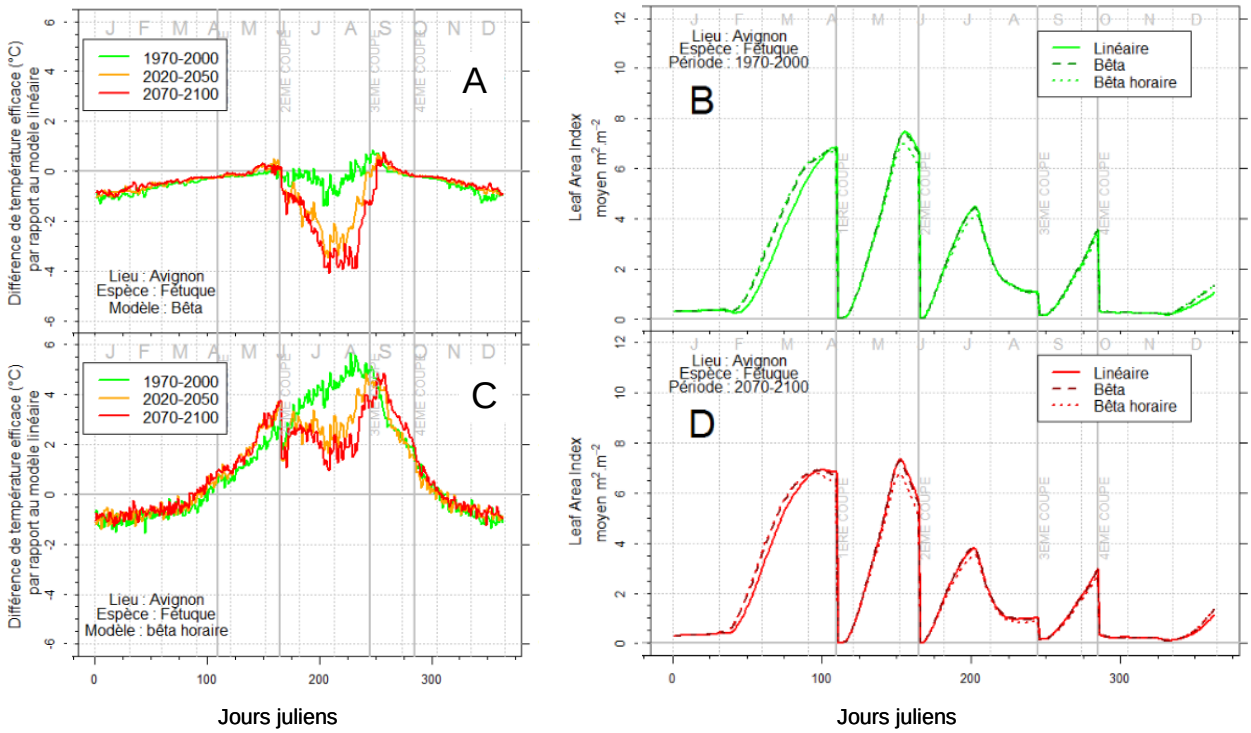


Figure 1 : Modifications des températures efficaces (moyennes sur 30 ans) liées au changement du formalisme de réponse à la température pour la fétuque à Avignon (A et C) et impacts sur la dynamique du LAI (B et D).

CONCLUSIONS

Le choix du formalisme de réponse à la température, et en particulier le pas de temps d'intégration des effets, a un impact important sur l'avancement des stades dans les climats futurs. Ces changement se sont révélés avoir un impact limité pour la production de biomasse totale des espèces fourragères, mais pourrait modifier de façon importante les prédictions pour des cultures dont le rendement est sensible au positionnement des stades phénologiques vis-à-vis des stress (e.g. céréales). Une révision de ce formalisme dans STICS serait donc souhaitable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson N, Levrault F. 2010 - Climate change, agriculture and forests in France: simulations of the Impacts on the main species. The Green Book of the CLIMATOR project (2007-2010). ADEME.

Zaka S., Ahmed L. Q., Escobar-Gutiérrez A. J., Gastal F., Julier B., Louarn, G., 2017 - How variable are non-linear developmental responses to temperature in two perennial forage species?. Agricultural and Forest Meteorology, 232, 433-442.

Zaka S., 2016 - Caractérisation et modélisation des réponses à la température de la luzerne et de la fétuque élevée pour des variétés d'origines contrastées–Application au modèle STICS. PhD Thesis, Univ. Poitiers. 171p.

SIMULATION DES ÉMISSIONS DE N_2O EN CLIMAT CONTINENTAL FROID ET HUMIDE

SIMULATION OF N_2O EMISSIONS IN COLD HUMID CONTINENTAL CLIMATE

Guillaume Jégo[1], Elizabeth Pattey[2], Martin Chantigny[1], Joël Léonard[3]

[1]Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec, Canada ; [2] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement d'Ottawa, Canada ; [3]Inra, UR AgroImpact, Laon, France

Mots clés : STICS, blé de printemps, fléole des prés, N_2O
Keywords : STICS, spring wheat, timothy, N_2O

INTRODUCTION

Les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) représentent une part importante des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole. La majeure partie de ces émissions est associée aux processus de dénitrification, et dans une moindre mesure de nitrification du sol. Ces deux processus sont fortement dépendant des conditions de température et d'humidité du sol ainsi que de la disponibilité en nitrate et en ammonium.
La plupart des inventaires d'émissions de N_2O réalisés au niveau mondial se basent sur des coefficients d'émission empiriques qui peuvent difficilement tenir compte de la variabilité temporelle et spatiale des émissions de N_2O. Pour pouvoir rendre compte de ces variabilités, des modèles plus mécanistes et capables de considérer l'effet des variations climatiques et des propriétés de sol, tel que DNDC ou DayCent par exemple, ont été développés. Récemment de nouveaux formalismes ont été ajoutés au modèle STICS (Brisson et al., 2008) afin de mieux simuler les processus de nitrification et de dénitrification et les émissions de N_2O qui en découlent (Bessou et al., 2010). Le développement et paramétrage de ces formalismes ont été réalisés en s'appuyant principalement sur des données expérimentales d'Europe de l'ouest. Afin d'étendre le domaine de validité du modèle, l'évaluation de ses performances pour la simulation des émissions de N_2O dans d'autres contextes pédoclimatiques est nécessaire.
L'objectif de cette étude est d'évaluer la performance de la nouvelle version de STICS pour simuler les émissions de N_2O durant la saison de croissance 1) d'une culture annuelle (blé de printemps; *Triticum aestivum* L.) et 2) d'une plante pérenne (fléole de prés; *Phleum pratense* L.) dans un climat continental froid et humide.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Des mesures d'émissions de N_2O provenant de deux sites expérimentaux (Québec et Ottawa) ont été utilisées pour évaluer les performances du modèle.
A Québec, des mesures ont été réalisées de 2001 à 2003 sur une parcelle de fléole des prés (graminée fourragère pérenne) sur un sol de type loam sableux. Les normales climatiques 1981-2010 indiquent une température moyenne annuelle de 4.2°C et des précipitations cumulées annuelles de 1189 mm pour ce site. Deux traitements de fertilisation azotée ont été appliqués : un traitement témoin avec aucune fertilisation et un traitement avec une dose de 140 kg N ha^{-1}. Les émissions de N_2O ont été mesurées manuellement pendant 21 jours après chaque application de fertilisant en utilisant des chambres statiques (Chantigny et al., 2007).
A Ottawa, les mesures ont été réalisées en 2001, 2003, 2005, 2011 et 2014 sur des parcelles de blé de printemps possédant des sols plus argileux qu'à Québec (loam limono-argileux à loam argileux). La température moyenne annuelle du site est de 6.4°C et les précipitations cumulées annuelles de 943 mm (normales climatiques 1981-2010). Plusieurs traitements de fertilisation minérale étaient inclus

avec des doses de 0 à 120 kg N ha^{-1}. Les flux de N_2O ont été mesurés en continu par la technique des gradients à l'aide d'un anémomètre sonique et d'un laser à réponse rapide (Pattey et al., 2007).
Sur les deux sites, les variables suivantes étaient également mesurées : biomasse aérienne, humidité du sol, nitrate et ammonium du sol (et surface foliaire et évapotranspiration à Ottawa). Au total 15 unités de simulations (6 USM à Québec et 9 USM à Ottawa) ont été définies et utilisées pour évaluer les performances du modèle. Le paramétrage par défaut a été utilisé pour la simulation de la nitrification et de la dénitrification avec l'option de calcul du potentiel de dénitrification en fonction du carbone organique du sol activée pour les 2 sites.

RÉSULTATS

Les émissions mesurées de N_2O sont beaucoup plus faibles sur la parcelle de fléole des prés (0 à 0,02 kg $N–N_2O$ ha^{-1} $jour^{-1}$) que sur les parcelles de blé de printemps (0 à 0,25 kg $N–N_2O$ ha^{-1} $jour^{-1}$). Ce résultat peut s'expliquer par une texture de sol plus grossière, moins favorable à la dénitrification, et par une disponibilité moins importante en azote minéral dans le sol avec culture de fléole de prés. Le modèle est capable de correctement reproduire cette tendance avec des gammes d'émissions de 0 à 0,04 kg $N–N_2O$ ha^{-1} $jour^{-1}$ pour la fléole de prés et de 0 à 0,32 kg $N–N_2O$ ha^{-1} $jour^{-1}$ pour le blé de printemps.
Les prédictions des pics d'émissions de N_2O par le modèle ne coïncident pas toujours avec les émissions observées, mais les cumuls prédits et observés au cours de la saison de croissance sont assez proches (différence < 30% pour 10 USM sur 15). Les différences les plus importantes sont souvent dues à une surestimation des émissions en fin de saison de croissance (août-octobre). Les mesures d'humidités du sol indiquent que, pour cette même période, le modèle a aussi tendance à surestimer la teneur en eau, ce qui pourrait expliquer en partie la surestimation des émissions de N_2O.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2008). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Éditions QUAE, Versailles, France.

Chantigny, M.H., Angers, D.A., Rochette, P., Bélanger, G., Massé, D., & Co^té, D. 2007. Gaseous nitrogen emissions and forage nitrogen uptake on soils fertilized with raw and treated swine manure. J. Environ. Qual. 36(6): 1864-1872.

Bessou, C., Mary, B., Léonard, J., Roussel, M., Gréhan, E., and Gabrielle, B. 2010. Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields. Eur. J. Soil Sci. 61(3): 348-363.

Pattey, E., Edwards, G.C., Desjardins, R.L., Pennock, D.J., Smith, W., Grant, B., & MacPherson, J.I. 2007. Tools for quantifying N_2O emissions from agroecosystems. Agric. For. Meteorol. 142(2-4): 103-119.

SIMULATION DE LA PRODUCTION DE BIOMASSE PAR UNE CULTURE DE LUZERNE SOUMISE À DES ITINÉRAIRES TECHNIQUES CONTRASTÉS AVEC LE MODÈLE STICS

SIMULATION OF BIOMASS PRODUCTION OF AN ALFALFA CROP UNDER CONTRASTED MANAGEMENT WITH THE STICS MODEL

Loïc Strullu[1,2], Nicolas Beaudoin[2], Bernadette Julier[1], Gaëtan Louarn[1]

[1] URP3F, Inra, 86600 Lusignan, France ; [2] UR 1158 AgroImpact, Inra, 02000 Barenton-Bugny, France

Mots clés : luzerne, biomasse, rythme de fauche, saison de croissance
Keywords : alfalfa, biomass, harvest frequency, growing season

INTRODUCTION

Les systèmes de culture à base de luzerne sont souvent promus non seulement pour la quantité et la qualité de leur production fourragère, mais pour d'autres services écosystémiques tels que l'apport d'azote dans les systèmes de culture (Louarn et al., 2015). Le rendement des fourrages dépend fortement de la saison de croissance et de la fréquence des récoltes. Les modèles agro-environnementaux permettent de simuler à la fois l'effet des pratiques culturales sur la production des cultures et leurs impacts environnementaux. Nous avons évalué les modifications apportées au modèle STICS (version v8.5) afin de simuler le partage de la biomasse et de l'azote entre les organes et entre structure et réserves au sein des organes, indépendamment du développement de la plante et de la gestion des cultures. Nous présentons ici les résultats évaluant la capacité du modèle à reproduire l'effet de la fréquence de coupe et de la saison de croissance sur le rendement.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les données utilisées pour la calibration sont issues des travaux de Thiébeau et al. (2011). Les expérimentations différaient en terme de rythme de fauche (R1 = rapide à R3 = lent) et de date de semis (printemps ou été). La méthode de calibration a consisté à réaliser des "essais erreur" successifs jusqu'à ce que les objectifs de performance soient atteints. Pour la validation du modèle, nous avons utilisé des données indépendantes issues de l'étude de Thiébeau et al. (2011) et d'expérimentations réalisées à Lusignan, Grignon, La Minière et Estrées-Mons (Gosse et al., 1984; Durand et al., 1989). La qualité des simulations a été évaluée à l'aide de différents indicateurs statistiques (Coucheney et al., 2015).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le modèle reproduit correctement la production de biomasse et l'accumulation d'azote dans la culture ainsi que leur partition entre les différents organes (Figure 1). Les différences de dynamiques entre la phase d'établissement de la culture et les repousses sont reproduites par le modèle grâce à la prise en compte des réserves carbonées et azotées accumulées dans le pivot. Il en résulte une bonne simulation des biomasses aériennes produites à la récolte (Figure 2). Cependant, l'effet de la saison de croissance sur la production de biomasse n'est pas suffisamment bien pris en compte par le modèle (surestimation en automne et sous-estimation au printemps).

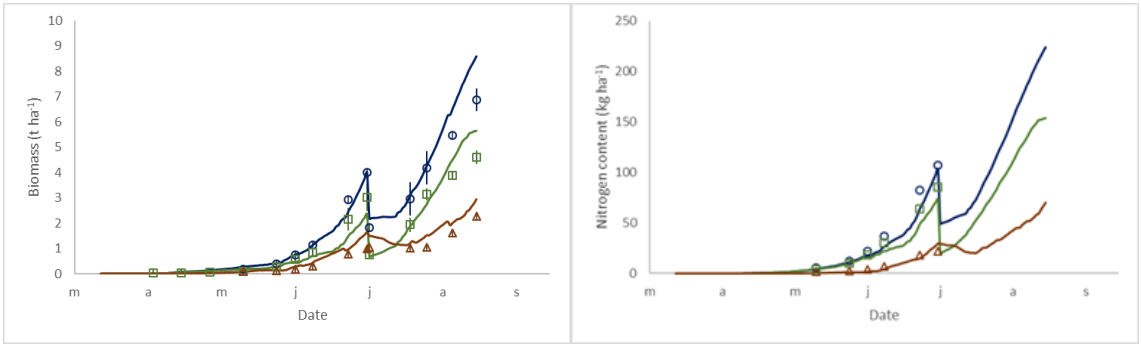


Figure 1 : Simulation de (gauche) la partition de la biomasse et (droite) de l'azote dans une culture de luzerne après le semis et la première fauche. Bleu : biomasse totale (aérien + pivot + racines) ; vert : biomasse aérienne ; marron : biomasse souterraine (pivot + racines). Symboles : données observées ; lignes : données simulées.

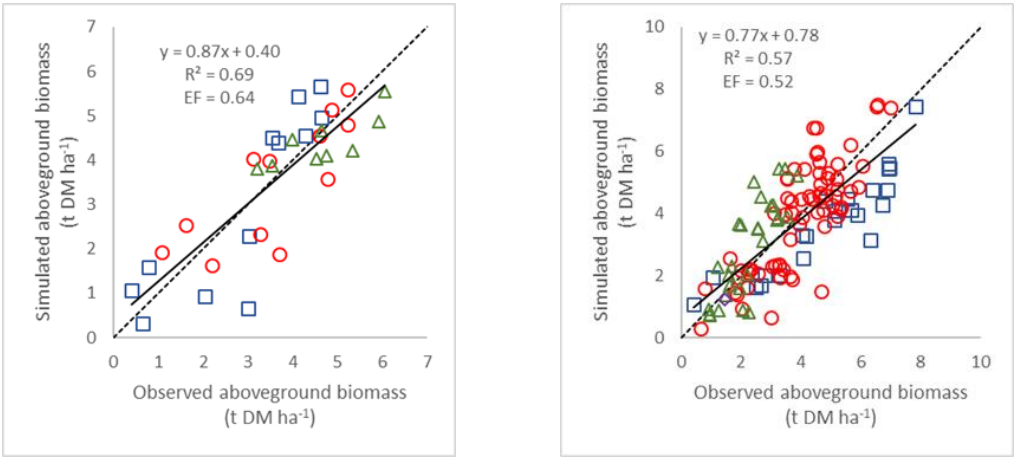


Figure 2 : Evaluation de la capacité du modèle à simuler (gauche) l'effet du rythme de fauche et (droite) l'effet de la saison de croissance sur la production de biomasse aérienne à la récolte par une culture de luzerne. Carrés bleu : rythme R1 / printemps ; ronds rouges : rythme R2 / été ; triangles verts : rythme R3 / automne.

CONCLUSION

Le modèle permet de reproduire correctement l'effet de l'ontogénie et des pratiques culturales sur la production de biomasse, l'accumulation d'azote et leur partition dans la plante. Notre prochain objectif, après l'amélioration de la simulation de l'effet de saison de croissance, sera d'évaluer la capacité du modèle à simuler la production de biomasse et la qualité d'une large gamme de variétés de luzerne.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Durand J-L., Lemaire G., Gosse G., and Chartier M. 1989 - An analysis of the conversion of solar energy to dry matter in a lucerne (*Medicago sativa*) population subjected to water deficit. Agronomie, 9, pp. 599-607.

Gosse G., Chartier M., Lemaire G. 1984 - Mise au point d'un modèle de prévision de production pour une culture de luzerne. C.R. Acad. Sci., Paris, série III, 298, pp. 541-544.

Louarn G., Pereira-Lopès E., Fustec J., Mary B., Voisin A. S., de Faccio Carvalho P. C., Gastal, F. 2015 - The amounts and dynamics of nitrogen transfer to grasses differ in alfalfa and white clover-based grass-legume mixtures as a result of rooting strategies and rhizodeposit quality. Plant and Soil, 389(1-2), pp 289-305.

Thiébeau P., Beaudoin N., Justes E., Allirand J.M., Lemaire G. 2011 - Radiation use efficiency and shoot:root dry matter partitioning in establishments and regrowth crops of lucerne (*Medicago sativa* L.) after spring and autumn sowings. European Journal of Agronomy, 35, pp. 255-268.

Coucheney E., Buis S., Launay M., Constantin J., Mary B., García Cortázar-Atauri I., Ripoche D., Beaudoin N., Ruget F., Andrianarisoa K.S., Le Bas C., Justes E. and Léonard J. (2015). Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environmental Modeling and Software, 64, pp.177-190. doi:10.1016/j.envsoft.2014.11.024

MODÉLISATION AVEC STICS DES SYSTÈMES DE CULTURE AVEC PRODUITS RÉSIDUAIRES ORGANIQUES : LIMITES DU MODÈLE DE DÉCOMPOSITION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET PERSPECTIVES

MODELLING WITH STICS CROPPING SYSTEMS WITH ORGANIC AMENDMENTS: CURRENT LIMITS OF THE ORGANIC MATTER DECOMPOSITION MODEL AND FUTURE PROSPECTS

Florent Levavasseur[1], Sabine Houot[1]

[1] UMR INRA AgroParisTech ECOSYS, Université Paris Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

Mots clés : Produits Résiduaires Organiques, STICS, paramétrage.
Keywords : Organic amendment, STICS, calibration.

INTRODUCTION

Les apports de Produits Résiduaires Organiques (PRO) ont des effets multiples sur la fertilité des sols mais aussi l'environnement (Houot et al., 2014). Afin de statuer sur l'intérêt de la pratique, il est nécessaire d'évaluer les performances agro-environnementales de systèmes de cultures intégrant des PRO. Différents essais au champ ont été mis en place dans ce but, comme par exemple le site QualiAgro[1]. Cependant, ces suivis ne permettent pas seuls de statuer sur l'intérêt des PRO (suivi ponctuel de certaines variables, variables non suivies, diversité pédo-climatiques limitée). Pour pallier ces manques, les modèles de culture, peuvent être des outils pertinents. Il est cependant nécessaire au préalable de tester leur capacité à simuler correctement les variables d'intérêt sur ces sites expérimentaux. L'objectif de ce travail est d'analyser la capacité du modèle STICS (Brisson et al., 2003) à simuler les dynamiques observées de différentes variables agronomiques et environnementales suivies sur le site expérimental de longue durée QualiAgro.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le site QualiAgro est localisé dans les Yvelines sur un sol limoneux profond. De 1998 à 2013, la rotation culturale est maïs-blé tendre. Quatre PRO sont apportés tous les deux ans en fin d'été précédant le maïs : un compost de déchets verts et boues d'épuration (DVB), un compost de biodéchets (BIO), un compost d'ordures ménagères résiduelles (OMR) et un fumier bovin (FUM), tandis qu'un témoin (TEM) est non amendé. Ces 5 modalités d'amendement sont croisées avec deux modalités de complémentation azotée (optimale : N+ ou minimale : N-). L'essai QualiAgro a été modélisé avec STICS, en simulation continue sur la période 1999-2013. Les variables d'intérêt mesurées au champ et simulées sont le rendement, l'humidité, la teneur en azote minéral et le stock en carbone organique du sol. Certains paramètres de sol de STICS ont d'abord été calibrés sur le traitement TEM_N+, puis utilisés pour les autres traitements : le meilleur jeu de paramètres parmi 10 000 tirages aléatoires a été retenu (meilleur compromis entre RRMSE rendement, humidité et azote minéral du sol). Pour chaque PRO, les paramètres du sous modèle résidus de STICS (Nicolardot et al., 2001) ont alors été calibrés. Le meilleur jeu de paramètres par PRO parmi 10 000 tirages aléatoire a été retenu (meilleur compromis entre RRMSE rendement, azote minéral et carbone organique du sol, pour les deux traitements par PRO).

[1] https://www6.inra.fr/qualiagro

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le traitement TEM_N+ est simulé correctement, avec des RRMSE égales à 12,1, 13,4, 36,2 et 3,5 %, pour le rendement, l'humidité, l'azote minéral et le carbone organique du sol (Figure 1). Les niveaux d'erreur sont comparables à d'autres utilisations du modèle STICS (Coucheney et al., 2015). Les rendements simulés des traitements N+ avec PRO ne sont pas satisfaisants (RRMSE rendement entre 18 et 26 %), probablement du fait d'une surestimation des fournitures en azote du sol. Cela se traduit également par une forte surestimation de l'azote minéral du sol pour les traitements DVB. Pour l'ensemble des modalités d'amendement, les traitements N- sont moins bien simulés. Les simulations de carbone organique sont de meilleure qualité (RRME < 7 %), et les dynamiques sont correctement reproduites, malgré une sous-estimation des valeurs les plus fortes (Figure 2).

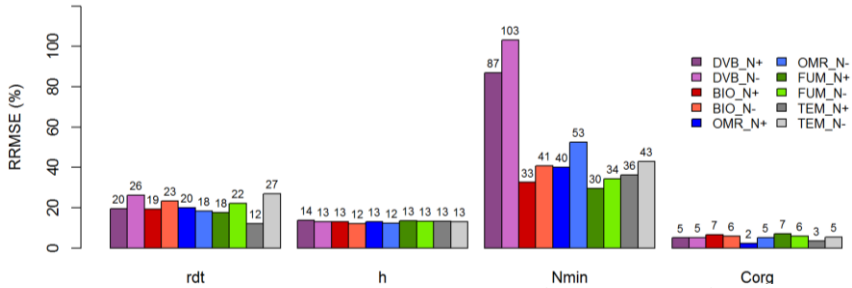


Figure 1 : RRMSE des rendements (rdt), humidité (h), azote minéral (Nmin) et carbone organique (Corg) du sol simulés avec STICS pour les différents traitements du site QualiAgro

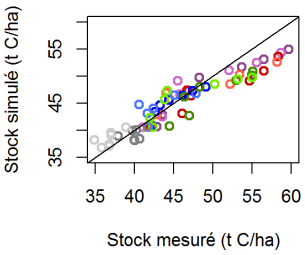


Figure 2 : Valeurs observées et simulées avec STICS de stocks de carbone organique du sol

Au vu de ces premiers résultats, des modifications du modèle résidus de STICS semblent nécessaires pour simuler correctement les traitements avec PRO. Il est envisagé de compartimenter la matière organique des PRO, notamment avec un compartiment stable qui intégrerait directement la matière organique stable du sol. Cette modification pourrait permettre de simuler l'augmentation du carbone organique du sol actuellement sous-estimée, tout en limitant la minéralisation d'azote.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Bussière F., 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of agronomy, 18(3), 309-332.

Coucheney E., Buis S., Launay M., Constantin J., Mary B., de Cortázar-Ataur, I. G., Le Bas C., 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. Environmental Modelling & Software, 64, 177-190.

Houot S., Pons M.N., Pradel M., Caillaud M.A., Savini I., Tibi A.(éditeurs), 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective, INRA-CNRS-Irstea (France).

Nicolardot B., Recous S., Mary B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. Plant and Soil, 228(1), 83-103.

AMÉLIORATION DE LA PRÉDICTION DE LA MINÉRALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE DU SOL DANS STICS

IMPROVED PREDICTION OF SOIL ORGANIC NITROGEN MINERALIZATION IN STICS

Hugues Clivot[1], Eric Justes[2] et Bruno Mary[1]

[1] Inra, UR 1158 AgroImpact, Barenton-Bugny, France ; [2] Inra, UMR INRA/INPT 1248 AGIR, Auzeville, Castanet-Tolosan, France

Mots clés : azote, minéralisation, matière organique stable du sol, sols nus
Keywords : nitrogen, mineralization, stable soil organic matter, bare soils

INTRODUCTION

La gestion de l'azote est un élément clé des systèmes de culture. Il est donc primordial de pouvoir prédire le plus précisément possible la minéralisation de l'azote organique du sol. Il a cependant été montré récemment que, même si les performances du modèle STICS pouvaient être globalement satisfaisantes, l'erreur de prédiction pour l'azote minéral dans le sol était plus importante que pour d'autres variables [1]. L'objectif de ce travail était donc d'améliorer la capacité de prédiction de la minéralisation de l'azote organique du sol dans STICS *via* l'optimisation de paramètres et l'implémentation de nouvelles fonctions liées à i) la minéralisation de l'azote et ii) au calcul d'une fraction stable de la matière organique humifiée du sol (MOS).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Nous avons utilisé un jeu de données de suivi de profils d'eau et d'azote minéral en sol nu, représentatif des conditions pédoclimatiques françaises, comprenant 131 unités de simulation (USM) (Fig.1). Le modèle STICS (version 8.41) a été évalué sur cette base au cours de 4 étapes :

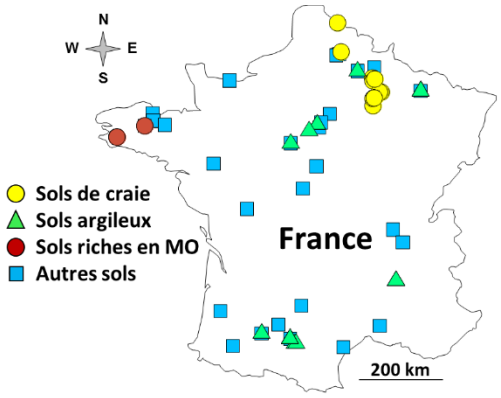


Figure1 : Localisation des 131 USM sur 44 sites.

a) Evaluation sans aucun reparamétrage. Le taux de minéralisation potentiel de l'humus (*K2HUM*) est calculé comme suit : $K2HUM = FMIN1.f(Argile).f(CaCO_3)$

b) Evaluation après optimisation du paramètre *FMIN1*

c) Evaluation du modèle (version 8.42) après implémentation d'un nouveau modèle de minéralisation. Nous avons utilisé la fonction récemment établie [2] :
$K2HUM = GMIN1.f(Argile).f(CaCO_3).f(pH).f(\frac{Corg}{Ntot})$
avec optimisation de *GMIN1*

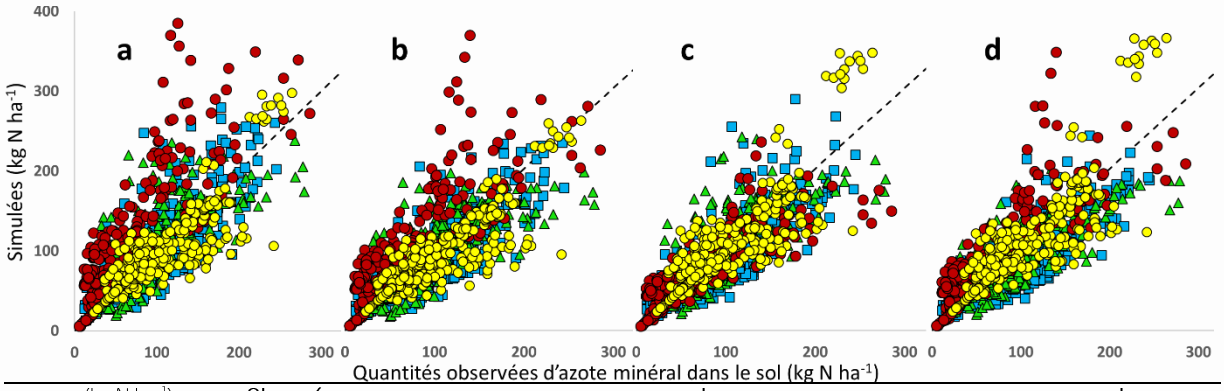
d) Evaluation de la version 8.42, en modifiant le calcul de la fraction organique stable. Au lieu d'être fixée (FINERT = 0,65), la fraction stable varie en fonction de la teneur en carbone organique (*Corg*), comme dans le modèle AMG [3] : $FINERT = Finert1.e^{-Finert2.Corg}$ avec optimisation de *GMIN1*, *Finert 1* = 0.80 et *Finert2* = 0.023

La méthode d'essai-erreur avec confrontation de critères d'évaluation statistiques (efficience du modèle, rRMSE et biais) a été utilisée pour l'optimisation des paramètres *FMIN1* et *GMIN1*.

RÉSULTATS

Comparativement à la version actuelle de STICS, la ré-optimisation du paramètre *FMIN1* montre une augmentation significative de l'efficience du modèle ainsi qu'une réduction du biais et de l'erreur de prédiction de l'azote minéral dans les sols (Fig.2 a *vs* b). L'implémentation de la nouvelle fonction de minéralisation (Fig.2c) améliore significativement les simulations faites par le modèle, en particulier pour les sols à fortes teneurs en matière organique. L'azote minéral simulé dans certains sols de craie est cependant surestimé. L'introduction de la fonction faisant varier la fraction stable de matière organique détériore légèrement (Fig.2d) les simulations faites par le modèle.

	a. STICS v8.41	b. *FMIN1* ré-optimisé	c. *GMIN1*	d. *GMIN1* & *FINERT*=
Efficience	0,30 (0,04)	0,54 (0,41)	0,65 (0,51)	0,59 (0,45)
rRMSE (%)	47,2 (80,7)	38,3 (63,4)	33,6 (57,9)	36,3 (61,4)
Biais (kg N ha^{-1})	-12,0 (-8,5)	0,1 (-2,1)	-0,1 (-2,7)	-0,3 (-2,7)



azomes (kg N ha^{-1})	Observées	a	b	c	d
Moyenne	94,4	106,4	94,4	94,5	94,7
Min	5,1	6,1	5,9	5,5	5,7
Max	285,4	457,4	365,2	344,0	361,9

Figure 2 : Quantités d'azote minéral observées *vs* simulées dans les profils de sol (*azomes*) et critères d'évaluation statistiques pour les différentes optimisations et fonctions de minéralisation. Les statistiques entre parenthèses correspondent aux quantités de nitrate simulées dans le premier horizon (*aznit.1*). Les légendes des figurés correspondent à celles de la figure1.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'implémentation de la nouvelle fonction de minéralisation dans STICS améliore significativement les capacités de prédiction de l'azote minéral dans le sol. Cependant, pour certains sols de craie, une surestimation de la minéralisation faite par le modèle est observée qui pourrait être due aux incertitudes liées aux mesures de teneurs en MOS dans ce type de sol. L'ajout d'une fonction faisant varier la proportion de MOS stable détériore les performances du modèle, probablement parce que la fonction de minéralisation a été développée en considérant cette proportion fixe. De futurs travaux sur la caractérisation de la fraction stable de la MOS pourraient permettre une évolution des paramètres associés à cette seconde fonction. L'amélioration de la prédiction de l'azote minéral en sols nus devra être également évaluée sur une base de données de sols cultivés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] E. Coucheney, S. Buis, M. Launay, J. Constantin, B. Mary, I. García de Cortázar-Atauri, D. Ripoche, N. Beaudoin, F. Ruget, K.S. Andrianarisoa, C. Le Bas, E. Justes, J. Léonard (2015) Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France, Environ. Model. Software. 64: 177– 190.

[2] H. Clivot, B. Mary, M. Valé, J.P. Cohan, L. Champolivier, F. Piraux, F. Laurent, E. Justes (2017) Quantifying *in situ* and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems, Soil Biol. Biochem. 111: 44–59.

[3] K. Saffih-Hdadi, B. Mary (2008) Modelling consequences of straw residues export on soil organic carbon, Soil Biol. Biochem. 40: 594– 607.

ÉVALUATION ET AMÉLIORATION DU MODULE MICROCLIMATIQUE DE STICS

EVALUATION AND IMPROVEMENT OF THE MICROCLIMATE MODULE OF STICS

Wafa Ben Othman[1], Noémie Gaudio[2], Marie Launay[1], Patrice Lecharpentier[1], Dominique Ripoche[1], Sébastien Saint Jean[3], Marc Saudreau[4]

[1]US 1116 AgroClim, 84914 Avignon ; [2]UMR 1248 AGIR, 31326 Auzeville ; [3]UMR 1402 Ecosys, 78850 Thiverval-Grignon ; [4]UMR 0547 PIAF, 63100 Clermont-Ferrand, Inra, France

Mots clés : formalismes, changement climatique, température de culture, expérimentation
Keywords : formalisations, climate change, crop temperature, field experiments

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le changement climatique (CC) menace la sécurité alimentaire à moyen terme (Zabel et al., 2014). Dans ce contexte, comprendre les mécanismes en jeu pour mieux les anticiper et adapter les systèmes de culture aux effets du CC s'avère crucial. Or, les cultures réagissent avant tout au microclimat au sein du couvert végétal, qui peut être différent du climat ambiant **(Rezaei et al. 2015)**. Ces différences peuvent atténuer ou au contraire accentuer les effets du CC. Les modèles de culture proposent un cadre virtuel intéressant pour construire des systèmes de culture plus résilients face au CC et le prérequis à l'utilisation de ces modèles dans ce contexte est la vérification de leur qualité prédictive pour la simulation du microclimat dans le couvert. Notre travail avait pour objectifs (i) d'évaluer la qualité prédictive du module de calcul du microclimat, et plus particulièrement de la température du couvert, du modèle STICS (Brisson et al., 2008) et de définir son domaine de validité et (ii) d'en améliorer les formalismes et/ou le paramétrage si nécessaire.

MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS

La température de l'air dans le couvert (Tcult) est calculée dans STICS à l'échelle journalière comme la moyenne des températures maximale et minimale de l'air dans le couvert ($Tcult_{max}$ et $Tcult_{min}$ resp.). Chacune d'elle est déterminée par un bilan d'énergie tel que :

$$Tcult_{min} = Tair_{min} + \frac{RN_{min} - G_{min}}{1200} \times r_{min} \quad \text{et} \quad Tcult_{max} = Tair_{max} + \frac{RN_{max} - G_{max} - ET_{max}}{1200} \times r_{max}$$

où Tair est la température de l'air sous abri (°C), RN le rayonnement net ($MJ.m^{-2}$), G le flux de conduction thermique dans le sol ($W.m^{-2}$), ET l'évapotranspiration ($W.m^{-2}$) et r la résistance aérodynamique ($s.m^{-1}$). Ces formalismes reposent sur deux hypothèses : i) la concomitance des valeurs minimales et maximales de Tair, Tcult, RN, ET et G et ii) l'homogénéité du microclimat dans le couvert.
Nous avons confronté ces formalismes et les hypothèses sur lesquelles ils reposaient à deux jeux de données expérimentales (Fig. 1) acquis en conditions climatiques contrastées (climat semi-océanique à Grignon en France et climat semi-aride à Maricopa en Arizona, avec expérimentations incluant un réchauffement infra-rouge) et illustrant des différences nettes entre le climat et le microclimat.

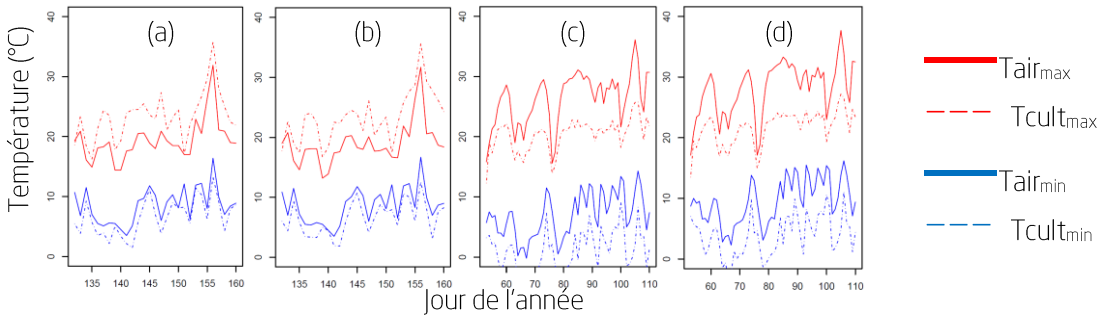


Figure 1 : Évolution de la température (°C) du couvert et de l'air maximales ($Tcult_{max}$, $Tair_{max}$) et minimales ($Tcult_{min}$, $Tair_{min}$) en fonction du temps pour le blé (a) et le pois (b) à Grignon, pour le traitement non chauffé (c) et le traitement chauffé (d) à Maricopa.

Plusieurs hypothèses ont été proposées, voire testées et implémentées, pour expliquer les erreurs du modèle, soit la dispersion dans le cas du site de Grignon (Fig. 2a) et le biais dans le cas du site de Maricopa (Fig. 2b) :
la température de la feuille (mesurée sur l'expérimentation en climat semi-aride, Maricopa) n'est pas un proxy de la température de l'air dans le couvert (simulée par STICS),
les phénomènes d'advection sont mal pris en compte par STICS, et en particulier l'augmentation de la résistance aérodynamique. Un facteur correctif du profil de vitesse du vent a donc été introduit, tenant compte de la stabilité de l'atmosphère et basé sur le calcul de la longueur de Monin-Obukhov **(Parcevaux and Huber, 2007)**,
les réchauffements infra-rouge utilisés pour simuler le réchauffement climatique ajoutent un terme au calcul du rayonnement net dans STICS. Il est maintenant possible de tenir compte de ce nouvel apport de chaleur dans le calcul du bilan d'énergie.

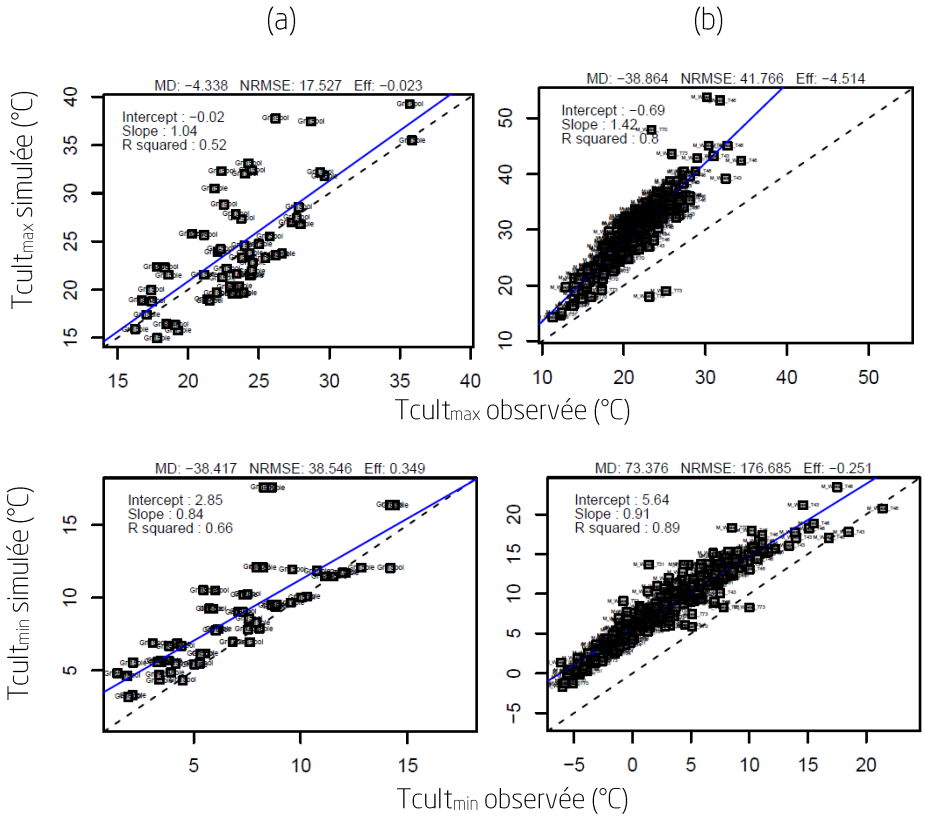


Figure 2 : Comparaison des températures ($Tcult_{min}$ et $Tcult_{max}$, °C) dans le couvert simulées et observées à Grignon (a) et Maricopa (b); Les critères suivants sont indiqués : écart moyen entre valeurs simulées et observées (MD), RMSE normalisée (NRMSE), efficience du modèle (Eff), ordonnée à l'origine (Intercept), pente (Slope) et coefficient de détermination (R squared) de la régression linéaire entre valeurs simulées et observées.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Grâce à une meilleure prise en compte des phénomènes advectifs et à la possibilité de simuler les expérimentations sur le CC incluant un réchauffement artificiel, les formalismes de STICS ont été améliorés. Ces travaux soulignent cependant l'importance de la stricte correspondance entre les variables mesurées dans les expérimentations et celles simulées par les modèles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson N, et al. (2008). Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model, p. 297.

Parcevaux S de, Hubert L (2007) Bioclimatologie : Concepts et applications. Quae éditions, Versailles

Rezaei EE, Webber H, Gaiser T, et al (2015). Eur J Agron 64:98–113. doi: 10.1016/j.eja.2014.10.003

Zabel F, Putzenlechner B, Mauser W (2014).Plos One 9.

COUPLAGE ET APPROCHES INTÉGRÉES MOBILISANT STICS

APPORT D'UN MODÈLE DE CULTURE À L'ANALYSE ÉCONOMIQUE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA DEMANDE EN EAU D'IRRIGATION EN FRANCE

CROP MODEL'S CONTRIBUTION TO THE ECONOMIC ANALYSIS OF CLIMATE CHANGE'S IMPACT ON AGRICULTURAL WATER DEMAND IN FRANCE

Pierre-Alain Jayet, Delphine Barberis et Anna Lungarska[1]

[1] UMR INRA-Agro Paris Tech Economie Publique, Grignon, France

Mots clés : demande en eau d'irrigation, prix de l'eau, changement climatique, modèle bio- économique d'offre agricole
Keywords : agricultural water demand, water prices, climate change, bio-economic supply model

INTRODUCTION

Le changement climatique (CC) est perçu comme l'un des principaux défis mondiaux du XXIème siècle. La hausse des températures, le bouleversement du régime des précipitations (ex : évolution des normales pluviométriques annuelles et de la variabilité temporelle) ainsi que la fréquence accrue de phénomènes météorologiques extrêmes sont autant d'éléments aux conséquences potentiellement fortes sur l'agriculture. Au vu des hypothèses formulées sur la baisse future de la disponibilité en eau et des tensions actuelles sur la ressource, l'intégration de l'irrigation dans l'étude de l'impact économique du CC apparaît comme une priorité. Dans un objectif d'aide à la décision publique par le biais d'outils de modélisation, il convient d'estimer la demande future d'irrigation et les impacts de politiques de régulation (e.g. gestion du prix de l'eau). Dans cette étude, nous partons du monde agricole tel que représenté par le modèle agro-économique, AROPAj[1], et proposons une analyse prospective centrée sur les liens entre climat, rendement et intrant eau, fournis par le modèle de culture STICS. Bien que l'approche soit conçue au niveau européen, l'agriculture française est privilégiée en raison de sa représentativité en termes de diversité de productions agricoles, de climat et de sol.

MODÈLE BIO-ÉCONOMIQUE : COUPLAGE ET ÉLABORATION DE FONCTIONS DOSE-RÉPONSE

Afin de simuler la réponse de l'agriculture à des changements économiques et climatiques, des informations agronomiques sont intégrées au modèle d'offre agricole AROPAj *via* l'utilisation de STICS, un outil de simulation de croissance végétale (Godard, 2008 ; Leclère, 2013 ; Humblot, 2017). Cette association a pour objectif l'évaluation de la demande en eau d'irrigation dans un contexte de maximisation de la marge brute des systèmes agricoles indépendamment d'une offre qui peut s'avérer limitante. Elle s'appuie sur la classification en « groupe-type » de fermes échantillonnées dans le RICA[2] (2009). Un grand nombre de simulations STICS sont réalisées selon différentes modalités de cultures (type de sol, date de semis etc.). Pour chaque groupe-type et chacune des 9 principales productions commercialisées en Europe (blé tendre, blé dur, maïs, orge, colza, tournesol, betterave, pomme de terre, soja), il en résulte l'élaboration d'une fonction dose-réponse à trois variables combinant les valeurs de rendements aux quantités d'intrants apportés en eau et en azote. Ces relations sont calibrées sur des données « observées » en 2009 *via* un critère économique fondé sur des rapports de prix. Une fois définies en temps présent, elles sont modifiées dans un contexte de CC dans le but d'estimer la demande en eau d'irrigation.

[1] https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie_publique/Publications

[2] RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole

Cette dernière est ainsi calculée en sortie d'AROPAj à différentes échelles (exploitation agricole, bassin versant et/ou région), en temps présent et futur et selon différentes modalités de prix de l'eau.

PROJECTIONS CLIMATIQUES ET ÉVOLUTION DE LA DEMANDE EN EAU D'IRRIGATION DE 2010 À 2100

Une première phase de modélisation consiste à évaluer par le couplage AROPAj-STICS l'effet du CC sur la demande en eau d'irrigation, indépendamment de toute politique de gestion de la ressource. Des fonctions de dose-réponse sont produites sur la base des projections climatiques fournies par le modèle ARPEGE-CLIMAT (2010 - 2100) et des scénarios d'évolution proposés par le GIEC (SRES-AR4 A2, A1b et B1). Etant supposés observer l'évolution des rendements en condition climatique future, les agriculteurs optimisent, en conséquence, selon notre approche, l'allocation des terres cultivées et les quantités d'intrants en maximisant leur marge brute. La date de semis, les choix variétaux et la sélection du précédent cultural restent ici inchangés. Les résultats d'AROPAj sont obtenus sur un pas de temps annuel et calculés par décennie de 2011-2020 à 2091-2100.
De par l'existence d'une forte variabilité interannuelle des précipitations (dates et quantités) et de la substituabilité entre productions agricoles (e.g. blé, orge, maïs), la trajectoire de la demande en eau apparait très irrégulière. Néanmoins, au vu des résultats, le CC aurait pour incidence une hausse globale significative de la demande en eau entre 2010 et 2100 pour les trois scénarios climatiques (ex : +75% - A1b ; +22% - B1). La réalisation de représentations cartographiques à l'échelle de la France illustre la grande capacité du modèle à saisir la diversité régionale des systèmes climatiques et agricoles. Les zones les plus impactées seraient situées principalement à l'Ouest (Aquitaine, Centre, Poitou-Charentes, Pays de la Loire) et dans la région PACA.

IMPACT DE LA HAUSSE DES COÛTS D'ACCÈS À L'EAU SUR LA DEMANDE D'IRRIGATION DANS UN CONTEXTE DE CC

Par la simulation de scénarios d'accroissement des coûts d'accès à l'eau via AROPAj, nous illustrons l'importance à moyen-terme du stress exercé sur la ressource dans un contexte de CC. Un coefficient de multiplication a été uniformément appliqué aux prix de l'eau estimés pour 2009. Pour les différentes évolutions climatiques de 2010 à 2100 et pour les 3 scénarios A2, B1 et A1b, le prix initial est augmenté dans les simulations de 0 à 100% avec un pas de 25%. Comme attendu, la hausse des coûts contribuerait à une baisse de la demande, fortement différenciée par région. Les plus affectées correspondraient aux plus irriguées en termes absolu et relatif. A titre d'exemple, multiplier le prix par deux conduirait à une réduction de la demande d'eau de 25% en Poitou-Charentes.

PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE

D'après ces résultats, une perspective intéressante porterait sur les choix variétaux et les dates de semis comme leviers d'adaptation des pratiques agricoles dans un contexte de CC. Il est également envisagé d'étendre cette approche à l'ensemble des pays de l'UE pour plusieurs des scénarios RCP proposés par le GIEC-AR5.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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.

Humblot, P., Jayet, P.-A., & Petsakos, A. (2017). Farm-level bio-economic modeling of water and nitrogen use: Calibrating yield response functions with limited data. Agricultural Systems, 151, 47–60.

Leclère, D., Jayet, P.-A., & de Noblet-Ducoudré, N. (2013). Farm-level Autonomous Adaptation of European

Agricultural Supply to Climate Change. Ecological Economics, 87, 1–14.

COUPLAGE D'UN MODÈLE DE DYNAMIQUE DE POPULATION AU MODÈLE DE CULTURE STICS AFIN D'ÉTUDIER LES INTERACTIONS PLANTE-HERBIVORE DANS UN CONTEXTE SPATIO-TEMPOREL. APPLICATION AU CAS DU PUCERON

Coupling a population dynamic model to the crop model STICS, in order to investigate plant-herbivore interactions under a spatio-temporal context. Case of application: aphids

Romain Bertrand*[1,2], Guillaume Robaldo[3], Hélène Raynal[3], André Chanzy[4], Michel Loreau[1,2], Jean Clobert[1]

1 : CNRS, UMR5321 SETE, F-09200 Moulis, France ; 2 : CNRS, CBTM, UMR5321 SETE, F-09200 Moulis, France ; 3 : Inra, UR0875 MIAT, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; 4 : Inra, UMR1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

Mots clés : modélisation individu-centrée ; dispersion ; interaction plante-herbivore ; écologie du paysage ;
Keywords : individual-based modelling ; dispersal ; plant-herbivore interactions; landscape ecology

INTRODUCTION :

Depuis Darwin (1859), nous savons que les animaux et leur habitat interagissent. L'habitat affecte les populations animales à travers les conditions environnementales (comme la disponibilité des ressources, le microclimat) ainsi qu'à travers la connectivité du paysage. Les animaux en retour modifient les caractéristiques de l'habitat, en consommant par exemple de la biomasse dans le cas d'herbivores. La plupart des modèles de dynamique de population actuels explorant les interactions plante-herbivore se concentrent sur l'effet de l'habitat sur les animaux et ne modélisent pas explicitement les modifications des conditions environnementales. Ils considèrent que le microclimat n'est pas modifié par les caractéristiques de l'habitat et/ou estiment la disponibilité des ressources à partir d'observations ponctuelles. En outre, ils s'intéressent rarement à modéliser l'effet de rétroaction des animaux sur l'habitat. Nous présentons ici un modèle de simulation visant à étudier les interactions plante-herbivore de manière plus réaliste qui couple un modèle de dynamique de population animale avec des modèles de plante.

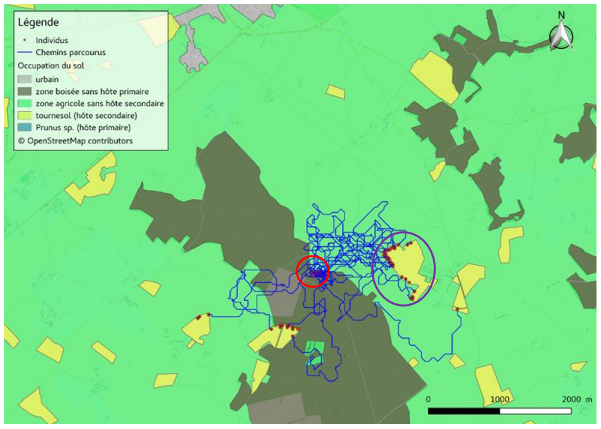
MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le modèle de dynamique de population qui a été développé pour l'étude, est mécaniste, spatialement explicite et semi-stochastique (Clobert et al. (2012)). Il simule le cycle de vie de chaque individu (caractérisé par la dispersion, la survie et la reproduction des différentes classes d'âge étudiées). Il est alimenté par des couches spatiales de capacité de charge et de connectivité de l'habitat qui résument la qualité de cet habitat pour l'animal considéré. Ces couches spatiales dépendent directement des conditions microclimatiques, de l'occupation des sols, de la production de biomasse et de l'itinéraire technique des cultures, et sont calculées à partir des données simulées par le modèle de culture STICS à une fréquence journalière. Ces couches spatiales sont réactualisées au cours de la simulation en fonction de l'évolution de l'habitat au cours du temps et notamment de l'effet de rétroaction de l'animal sur l'habitat correspondant à la biomasse végétale consommée chaque jour par la population d'herbivores sur chaque cellule spatiale où une culture est présente. Cette valeur de biomasse est réinjectée dans le modèle STICS afin de corriger la valeur de la variable d'état biomasse. La généricité du couplage est assurée par celle de ses composantes. En effet le modèle de dynamique de population peut être paramétré pour chaque espèce alors que le modèle STICS est maintenant paramétré pour une large gamme de cultures. Le modèle de dynamique de population, son couplage

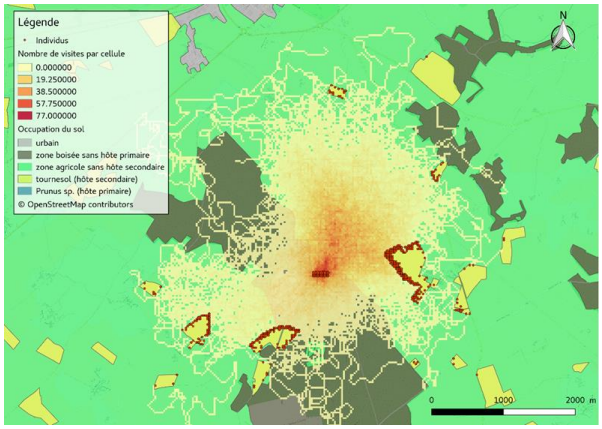
au modèle STICS et son instanciation à l'échelle du paysage ont été implémentés sur la plateforme RECORD (Bergez et al. 2012, Bergez et al. 2014).
Nous avons illustré cette approche en l'appliquant au contexte d'un système agricole envahi par le puceron du Prunier (*Brachycaudus helichrysi*). Ce dernier est un ravageur de la culture du tournesol (hôte secondaire). Le puceron impacte la croissance du tournesol dès le début de sa phase végétative jusqu'à la récolte (soit entre avril et septembre). Au cours de l'automne, le puceron regagne son hôte primaire (le Prunier dans ce cas) où il dépose ses œufs pour passer l'hiver. Le paysage considéré est une zone agroforestière de 100km² autour de Lusignan (Nouvelle-Aquitaine) entre 2012 et 2016.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La simulation permet de produire des résultats sur les effectifs de pucerons (ex Carte 2), et la dynamique spatio-temporelle de cette population de pucerons (ex Cartes 1 et 2). Par ailleurs, dans ce cas d'étude le rendement de la parcelle encerclée de violet a été affecté. L'impact est fonction du foyer d'infestation primaire. La validation de ce modèle a été faite à dire d'expert compte-tenu du peu de données disponibles. Malgré cette faiblesse, ce type de modèle peut être utilisé pour étudier l'impact du paysage et de l'agencement agricole sur les espèces et en particulier les bio-agresseurs des cultures. Ainsi, sur les cartes 1 & 2, nous pouvons constater que la forêt joue le rôle d'écran à la dispersion des pucerons. De même, le modèle pourrait être utiliser pour tester l'impact de la désynchronisation potentielle des cycles de vie des espèces en lien par exemple avec le changement climatique.



Carte 1 : Exemple de chemins parcourus par les pucerons durant un événement de dispersion de la population.
Seuls, les chemins parcourus par les pucerons qui vont atteindre les parcelles de tournesol sont représentés.
Le foyer initial de pucerons est encerclé de rouge.



Carte 2 : Exemple de nombre de visites de puceron par pixel durant un événement de dispersion. Les points rouges matérialisent la densité de population.

REMERCIEMENTS

Cette étude été financée par le Programme Investissements d'Avenir ANAEE-France et mise en oeuvre par l'ANR (ANR-11-INBS-0001).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Clobert C, Baguette M, Benton TG, Bullock JM. Dispersal ecology and evolution. Oxford: Oxford University Press; 2012.

J.-E. Bergez, P. Chabrier, C. Gary, M.H. Jeuffroy, D. Makowski, G. Quesnel, E. Ramat, H. Raynal, N. Rousse, D. Wallach, P. Debaeke, P. Durand, M. Duru, J. Dury, P. Faverdin, C. Gascuel-Odoux, F. Garcia, 2012, An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems, Environmental Modelling & Software, Volume 39, January 2013, Pages 39-49, ISSN 1364-8152, 10.1016/j.envsoft.2012.03.011.

J.E. Bergez, H. Raynal, M. Launay, N. Beaudoin, E. Casellas, J. Caubel, P. Chabrier, E. Coucheney, J. Dury, I. Garcia de Cortazar-Atauri, E. Justes, B. Mary, D. Ripoche, F. Ruget, Evolution of the STICS crop model to tackle new environmental issues: new formalisms and integration in the modelling and simulation platform record, Environ. Model. Softw., 62 (2014), pp. 370–384 http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.010

DIAGNOSTIC DES FACTEURS LIMITANTS DU RENDEMENT DES CÉRÉALES BIOLOGIQUES PAR COUPLAGE OBSERVATION *IN SITU* ET MODÉLISATION AVEC STICS

YIELD GAP ANALYSIS OF ORGANIC CEREALS BASED ON FIELD NETWORK MONITORING AND STICS MODEL

Lucia Rakotovololona[1], Amélie Lengrand[1], Aïcha Ronceux[2], Elise Favrelière[2], Florent Chlébowski[1], Bruno Mary[1], Nicolas Beaudoin[1]

[1] Inra, UR 1158 AgroImpact, 02000 Barenton-Bugny, France ; [2] Agro-Transfert Ressources et Territoires, 80200 Estrées-Mons, France

Mots clés : blé tendre, triticale, rendement potentiel, stress biotique, stress abiotique
Keywords : winter wheat, triticale, potential yield, abiotic stress, biotic stress

INTRODUCTION

L'agriculture biologique (AB) est considérée comme un prototype d'agriculture durable et, en ce sens, se doit de contribuer à relever le défi alimentaire mondial. Comprendre et modéliser les déterminants de la production s'avère important afin d'identifier des voies d'amélioration des systèmes de grandes cultures biologiques. L'approche par *yield gap analysis*, permettant de coupler le suivi expérimental à une modélisation déterministe, est ici mis en œuvre en vue de diagnostiquer les facteurs limitant le rendement du blé et du triticale en situation agricole.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Un réseau de parcelles conduites en agriculture biologique a été suivi pendant trois années, 2014-2015, 2015-2016 et 2016-2017, afin de recueillir différentes mesures sur les cultures, sur les stocks en eau et azote du sol, sur les caractéristiques pédoclimatiques et sur l'itinéraire technique. L'approche adoptée consiste à estimer les rendements potentiels puis calculer les écarts entre les rendements réels et potentiels (Fischer *et al.*, 2015). STICS a été utilisé pour prédire différents niveaux de rendement potentiel, en activant/désactivant les options de simulation des stress en eau et/ou azote. La version de recherche de STICS « à réserves » a été préalablement calibrée et testée en situation expérimentale AB avec peu ou pas de limitations liées aux bio-agresseurs (Chlébowski *et al.*, 2017). Les écarts de rendement « potentiel-réel » sont ensuite confrontés aux indicateurs de stress simulés par le modèle et à aux facteurs biotiques mesurés expérimentalement (adventices, maladies).

RÉSULTATS

Les performances de prédiction du modèle STICS en situation AB réelle sont satisfaisantes, que ce soit pour les stocks en eau et en azote du sol, la biomasse aérienne totale, et les quantités d'azote présentes dans les plantes. Les rendements potentiels ($Y_{sim.pot}$), définis par les conditions pédoclimatiques de la parcelle sans limitation en eau ni azote, sont en moyenne de 8.5 t MS/ha pour le blé et 8.0 t MS/ha pour le triticale, pour des rendements réels moyens ($Y_{obs.moy}$) allant de 2.3 à 5.0 t MS/ha pour le blé et 2.5 à 4.3 t MS/ha pour le triticale (*cf.* figure 1). L'écart au rendement (Y_{gap}) est variable en fonction des années, de 55% à 72% en 2014-2015 et 2015-2016, contre 39% pour le blé en 2016-2017. La part de variabilité du *yield gap* expliqué par les différents facteurs de stress abiotiques et biotiques varie selon les années climatiques (*cf.* figure 2). La confrontation de l'écart entre le rendement potentiel limité en N ($Y_{sim.N}$) et le rendement réel $Y_{obs.moy}$, aux facteurs biotiques mesurés expérimentalement ne permet pas de mettre en évidence des relations significatives, toutefois, on constate une tendance à l'augmentation de ce *yield gap* résiduel lorsque l'infestation

des adventices et la présence des maladies est plus importante. L'indice de récolte, le nombre de grains produits et le poids de mille grains pour les situations au potentiel simulées par le modèle avec limitation en eau et azote sont plus élevés que les valeurs observées correspondantes, signalant l'effet probable de stress survenu au cours des différentes phases de l'élaboration du rendement.

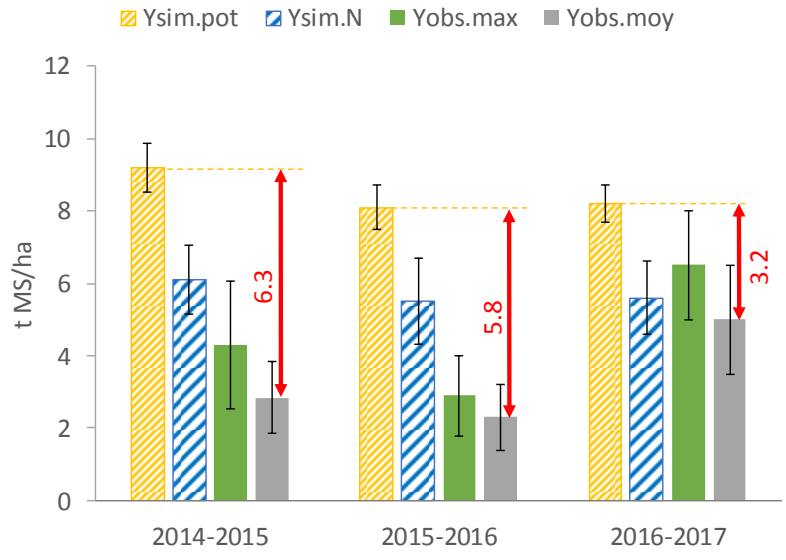


Figure 1 : Rendements potentiels simulés par STICS, rendements réels moyens et maximaux observés, et *yield gap* pour le blé (en rouge). Valeurs moyennes et écart-type entre parcelles.

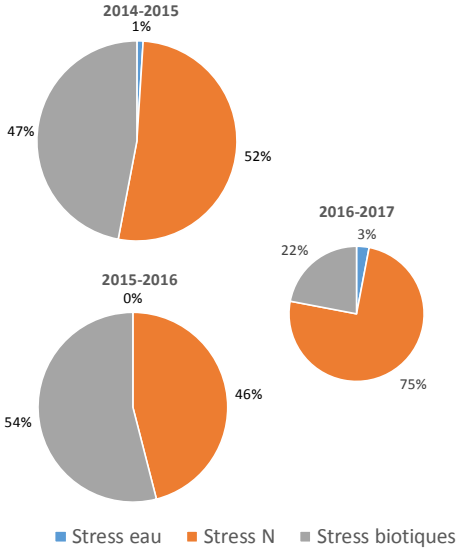


Figure 2 : Parts du *yield gap* du blé expliqués par les différents facteurs de stress : eau, azote et biotiques, pour les trois années suivies.

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'utilisation du modèle STICS en tant qu'outil de diagnostic permet d'isoler les effets des facteurs eau et azote, de décomposer le rendement et de comprendre le poids du contexte pédoclimatique sur les écarts au potentiel. Les faibles rendements obtenus par les céréales en conditions réelles AB peuvent être expliqués par la disponibilité en azote pour les cultures, puis partiellement par la pression des adventices et des maladies foliaires. Ces deux contraintes, la fourniture en azote et la maîtrise des adventices, constituent notamment les principaux verrous techniques identifiés par les producteurs en grande culture biologique (Fontaine *et al.*, 2012). Cette étude sur la productivité des grandes cultures biologiques s'inscrit dans la réflexion sur l'évaluation des performances agro-environnementales de l'AB et sa pertinence en tant que prototype de système de production durable. D'autres aspects, notamment la question des impacts environnementaux liés aux flux d'eau et d'azote générés par les parcelles en AB, devraient aussi être explorés.

REMERCIEMENTS

Cette étude menée au sein d'Agrimpact a bénéficié de l'aide financière de l'INRA, de l'Agence de l'Eau Seine Normandie et du PIREN-Seine, et de l'accueil par les agriculteurs du réseau du projet « AgriBio ». Nous remercions les collègues de l'unité AgroImpact, notamment E. Venet, A. Teixeira et M. Ronsin, d'Agro-Transfert, des Chambres d'Agriculture et des associations GabNor et ABP, pour leur contribution. Nous remercions Météo France – AgroClim et le réseau DEMETER pour les données météorologiques, et « the last not the least », l'Equipe du Projet STICS, pour l'outil, son cadre conceptuel et son réseau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chlébowski F. *et al.*, 2017 - Adaptation, parametrization and genericity of the STICS model applied to organic farming, *in prep.*

Fischer R.A., 2015 – Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. Field Crop Research, 182, 9-18.

Fontaine L. *et al.*, 2012 – Connaître, Caractériser et Évaluer Les Rotations En Systèmes de Grandes Cultures Biologiques. Innovations Agronomiques, 25, 27–40.

OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION MOBILISANT STICS

MÉTHODE D'IDENTIFICATION DES TAUX OPTIMUM D'AZOTE DES CULTURES PLUVIALES À L'AIDE DE MODÈLE DE CULTURES

A MODEL-BASED METHODOLOGY TO DERIVE OPTIMUM NITROGEN RATES FOR RAINFED CROPS

Elizabeth Pattey[1], Morteza Mesbah[2], Guillaume Jégo[3]

[1] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Ontario, Canada ; [2] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Charlottetown, IPE, Canada ; [3] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, Québec, Canada

Mots clés : Efficacité d'utilisation de l'azote, dose d'azote recommandée, Excès d'azote, variations climatiques, azote réactif
Keywords : N use efficiency; recommended N fertilizer; N excess; climate variations; reactive N.

INTRODUCTION

Il est très important de pouvoir identifier quelles doses d'azote (N) permettent d'augmenter la productivité des cultures pluviales, surtout celles qui requièrent des doses élevées comme le maïs grain, tout en limitant les pertes d'azote dans l'environnement (Galloway et al., 2003). Le défi est de taille parce que le taux d'N optimum (N_{opt}) ne dépend pas uniquement des besoins de la culture et des propriétés de sols mais aussi des variations climatiques journalières, saisonnières et interannuelles. L'application de doses d'N supérieures aux besoins des cultures contribue à la libération d'N réactif dans l'environnement, concourant au lessivage des nitrates vers les nappes phréatiques, à la volatilisation de l'ammoniac et à l'émission de N_2O, un des gaz à effet de serre contribuant au forçage radiatif. Le développement d'une méthodologie permettant de tenir compte des variations climatiques journalières et interannuelles dans la détermination de N_{opt} représente une étape importante de mise au point d'un système intégré d'aide à la décision de recommandations révisées de dosage d'N limitant les pertes d'N réactif. Cette approche repose sur la simulation, avec de longues séries climatiques, des rendements en réponse aux doses d'N, à l'aide d'un modèle de culture adapté à la région et aux cultivars actuels et dont les processus ont été vérifiés. Nous avons retenu STICS (Brisson et al., 2003), qui rencontre ces critères pour la culture du maïs dans l'Est du Canada (Jégo et al., 2011, 2015), pour présenter la méthodologie et son étude de cas du maïs. Nos objectifs sont de proposer 1) une nouvelle fonction du rendement en réponse à l'azote, 2) une méthode pour dériver N_{opt} en fonction de l'écophysiologie de la culture et 3) des recommandations de doses d'N en fonction de la probabilité du rendement escompté.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

L'étude de cas a été réalisée dans cinq régions de l'écozone à foret mixte de l'est du Canada (Windsor, London, Ottawa, St-Hubert et Québec) pour lesquels plus de 50 années de données climatiques journalières ont été assemblées. Pour effectuer les simulations, les trois textures de sols les plus dominantes et contrastées ont été sélectionnées dans la base de données des sols du Canada en superposant la carte des champs de maïs de 2013 extraites de la télédétection dans chaque région sur 40 x 40 km. Le modèle STICS a été utilisé pour prédire le rendement du maïs en définissant des cultivars adaptés selon les régions et en définissant des dates de semis adaptées à chaque région Pour chaque année climatique, sol et région, les simulations ont été effectuées pour des doses d'N variant entre 50 et 200 kg N ha^{-1}, par incrément de 10 kg N ha^{-1}, sauf pour l'argile et l'argile limoneuse où l'intervalle était plutôt entre 100 et 250 kg N ha^{-1}. Plus de 14800 simulations ont été effectuées. La performance des trois fonctions suivantes a été évaluée pour décrire la réponse individuelle du rendement de maïs aux doses d'N : linéaire plateau (LP), Mitscherlish–Baule (MB) et Mitscherlish–Baule-

plateau (MB-P). La fonction MB-P que nous avons proposée s'est avérée la plus performante et a été retenues pour la suite de l'étude.

MÉTHODE D'IDENTIFICATION D'N_{OPT}

La méthodologie proposée permet d'identifier, pour une région et un sol donné, l'efficacité d'utilisation de l'N optimum (NUE_{opt}), qui va permettre de déterminer les valeurs de N_{opt} en réponse au climat par saison de croissance. Les critères de sélection du NUE_{opt} reposent sur l'évaluation de la linéarité de la réponse du rendement aux doses d'N et à la réduction de rendement engendré par rapport au rendement maximum pouvant être atteint. Pour identifier NUE_{opt} , une série de données rendement-N_{opt} est extraites des fonctions MB-P ajustées pour des valeurs prédéfinies de NUE. Pour chaque NUE, la linéarité de la régression linéaire entre le rendement et N_{opt} ainsi que la réduction minimale du rendement permettent de définir NUE_{opt} à l'aide d'un graphique de compromis. Selon le rendement visé, sa probabilité d'être atteint, et le NUE retenu, la relation entre le rendement et N_{opt} permet de dériver la recommandation d'N. La diminution moyenne de rendement et l'excès ou le déficit d'N moyen sur l'ensemble des années simulées sont aussi calculés. La méthodologie proposée est compatible avec la quantification des émissions de N_2O et la volatilisation de l'ammoniac associée aux doses d'N recommandées. L'application de la méthodologie dans la principale zone de production de maïs dans l'est du Canada a montré qu'il serait possible d'affiner grandement les doses recommandées d'N à apporter en fonction des sols et des probabilités de rendements maximum liées aux contraintes climatiques (doses comprises entre 79 et 199 kg N ha^{-1}).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., 2003. An overview of the crop model STICS. Eur. J. Agron. 18, 309–332.

Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman, J.W., Seitzinger, S.P., Howarth, R.W., Cowling, E.B., Cosby, B.J., 2003. The nitrogen cascade. Bioscience 53, 341–356.

Jégo, G., Pattey, E., Bourgeois, G., Drury, C.F., Tremblay, N., 2011. Evaluation of the STICS crop growth model with maize cultivar parameters calibrated for Eastern Canada. Agron. Sustain. Dev. 31, 557–570. doi:10.1007/s13593-011-0014-4

Jégo, G., Pattey, E., Mesbah, M., Liu, J., Duchesne, I. 2015. Impact of the spatial resolution of climatic data and soil physical properties on regional corn yield predictions using the STICS crop model. Int. J. Appl. Earth. Obs. Geoinf. 41, 11-22.

PRODUIRE DES PRÉCONISATIONS DE CONDUITE DES CULTURES INTERMÉDIAIRES PAR LA SIMULATION DE DONNÉES VIRTUELLES AVEC LE MODÈLE STICS

PRODUCTION OF RECOMMENDATIONS FOR COVER CROP MANAGEMENTS BY SIMULATION OF VIRTUAL DATA USING STICS SOIL-CROP MODEL

Romain Crignon[1], Eric Justes[2], Caroline Godard[1], Jérôme Pernel[1]

[1] Agro-Transfert Ressources et Territoires, Estrées-Mons, France ; [2] Inra, UMR AGIR, Toulouse-Auzeville, France

Mots clés : culture intermédiaire, multi-simulation, préconisations, co-conception
Keywords : cover crop, multi-simulation, recommendations, codesign

INTRODUCTION

La couverture des sols avec des cultures intermédiaires (CI) en interculture est une pratique qui, portée par les plans d'actions successifs de la directive nitrate, est désormais largement utilisée. En région Hauts de France cette pratique est historiquement liée à la présence de cultures industrielles comme la betterave sucrière et à l'utilisation de la moutarde blanche comme CI. Parallèlement, une large gamme de bénéfices peut être associée aux cultures intermédiaires ou CIMS (CI Multi-Services) : i) réduction des pertes d'azote nitrique par lixiviation, ii) amélioration de la disponibilité en azote pour la culture suivante (effet engrais vert), iii) amélioration du stock de matière organique, etc... La production de ces services est cependant fortement dépendant des conditions de culture et des choix de conduites de l'agriculteur (Thorup-Kristensen et al., 2003 ; Tribouillois et al., 2016). De fortes disparités de conduite sont observées sur le terrain (Figure 2) en partie expliquées par le degré d'acceptation de la technique par l'agriculteur et ses contraintes organisationnelles. Afin d'orienter l'étude au plus près des besoins des utilisateurs finaux (agriculteurs, conseillers agricoles), ceux-ci sont impliqués dans la démarche de production de références par simulation, ainsi que pour des expérimentations locales. Des travaux d'évaluation des services écosystémiques fournis par les CIMS menés à l'aide du modèle STICS (Constantin et al., 2015) ont notamment permis de préconiser des date de semis et de destruction pour réduire le risque de pertes de nitrate pour une large gamme de situations à l'échelle nationale. L'objet du présent travail est d'utiliser le modèle de culture STICS pour évaluer l'impact des choix de gestion des couverts d'interculture sur la production de services écosystémiques dans différentes situations pédoclimatiques et systèmes de culture dans la région des Hauts de France.

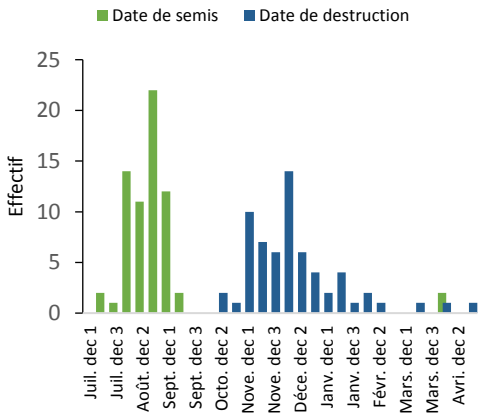


Figure 2 : Fréquence des interventions de semis et de destruction de la culture intermédiaire par décade (Source enquêtes approfondies en Hauts de France - n = 46 agriculteurs)

MÉTHODE PROPOSÉE

L'approche proposée prévoit de co-construire le plan d'expérimentation virtuelle entre les acteurs locaux du développement et de l'enseignement et une expertise scientifique sur le modèle (Figure 3). L'objectif est de faire converger les visions des différents acteurs dans la co-construction des hypothèses et le choix des facteurs étudiés. Pour chacune des expérimentations virtuelles, il est prévu de simuler le développement de la CIMS et de la culture suivante pour évaluer i) les services de

réduction de la lixiviation de nitrate, ii) l'effet sur la disponibilité en eau sur le profil de sol au semis) et en azote pour la culture suivante, et iii) la quantité de biomasse restituée déterminant le futur stockage de C dans le sol.

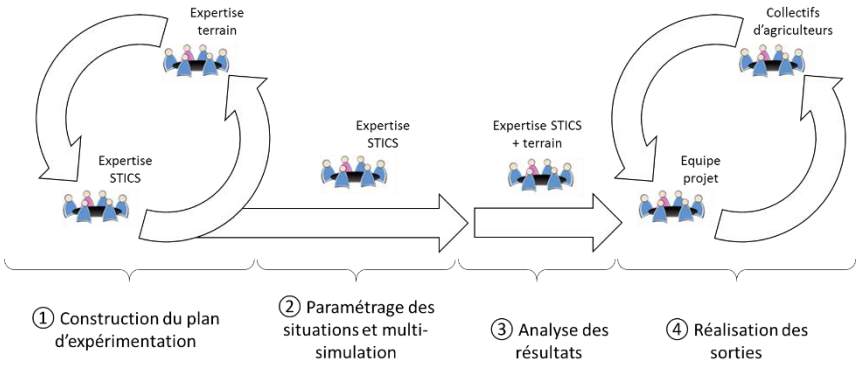


Figure 3 : Schéma de la méthode proposée pour l'étude

RÉSULTATS ATTENDUS

Une pré-étude a été réalisée en 2016 où 400 situations ont été simulées. Elle a permis d'évaluer l'impact des dates de levée (3 modalités) et de destruction (5 modalités) sous trois niveaux de reliquat post-récolte (25, 50 et 100 kgN.ha^{-1} notés respectivement N1, N2 et N3) en situation de limons sableux pour deux espèces de CIMS (vesce commune et moutarde blanche). Les premiers résultats montrent que l'impact du retard de la date de semis a toujours un impact négatif sur le piégeage de l'azote nitrique et la production de biomasse de la CIMS, quelle que soit l'espèce. L'impact d'un report de la date de destruction sur la disponibilité en azote pour la culture suivante semble dépendant du type de couvert : elle tend à s'accroitre avec le maintien de la vesce tandis qu'elle diminue pour la moutarde blanche (Figure 4). Les résultats ont par ailleurs permis de mettre en évidence des scénarios de gestion des couverts d'interculture intéressants du point de vue des services produits (décalage de dates de destruction, introduction de légumineuses) et de les proposer pour expérimentation au champ, chez les agriculteurs, ceci afin d'en évaluer la faisabilité technique. Les résultats permettront d'aboutir à des préconisations de conduite des CIMS adaptées aux objectifs (services visés) de l'agriculteur et à la situation locale.

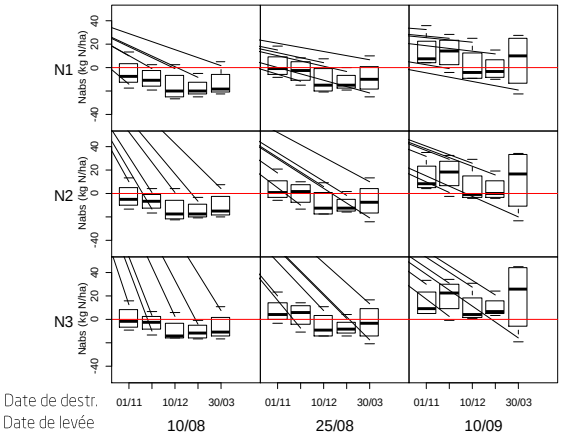


Figure 4 : Ecart d'azote absorbé (QNplante$_{CI}$ - QNplante$_{SN}$) par le maïs suivant une moutarde blanche selon la date de levée, de destruction et le niveau de reliquat post récolte en comparaison avec le sol nu (Résultats de simulations avec STICS,

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Constantin J., Le Bas C., Justes E., 2015 – Large scale assessment of optimal and destruction dates for cover crops to reduce nitrate leaching in temperate conditions using the STICS soil-crop model. European journal of Agronomy, 69, 75-87.

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(1), 171-185.

Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L., 2003 – Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. Advances in agronomy, 79, 227-302.

Tribouillois H., Cohan J-P, Justes E., 2016 – Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling. Plant Soil, 40, 347-364

OPTIMISATION DE LA FERTILISATION AZOTÉE SUR BASE D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION CONSTRUIT AUTOUR DU MODÈLE SOL-CULTURE STICS

OPTIMIZING N FERTILIZATION MANAGEMENT ON THE BASIS OF A DECISION SUPPORT SYSTEM BUILT AROUND THE STICS SOIL-CROP MODEL

Benjamin Dumont[1], Bruno Basso[2], Bernard Bodson[1]

1 Gembloux Agro-Bio Tech – Université de Liège, 5030 Gembloux, Belgique ; 2 Michigan State University, 48823 East Lansing, MI, USA

Mots clés : Algorithme, Azote, processus décisionnel, nutrition des plantes
Keywords : Algorithm, Nitrogen, decisional process, plant nutrition

INTRODUCTION

Depuis 2002, le Programme de Gestion Durable de l'Azote (Vandenberghe et al., 2013), transposition wallonne (Be) de la Directive Nitrate 91/676/EEC, défini des «bonnes pratiques agricoles» pour réduire les nuisances environnementales tout en visant à maintenir la productivité. Afin de s'assurer de leur bonne mise en pratique, un système d'audit des parcelles agricoles a développé[2]. Chaque année, 3% des agriculteurs wallons sont aléatoirement audités. L'azote potentiellement lessivable (APL), défini comme la quantité d'azote minéral $N\text{-}NO_3^-$ disponible dans le profil de sol 0-90cm, est quantifié à l'aide de prélèvements *in situ* et utilisé comme outil de contrôle. Les APL obtenus dans ces exploitations sont comparés aux APL mesurés dans un réseau de 35 exploitations de références. Si l'évaluation est négative, *i.e.* si les APL sont supérieurs au percentile 66 des mesures de référence, l'agriculteur rentre dans un programme de suivi, avec risque d'amende[1]. Bien qu'offrant globalement de bons résultats, le problème majeur de cette approche est que les mesures APL et les seuils de tolérances sont établis après la saison culturale. En particulier, parmi les facteurs de risque, la gestion de la fertilisation azotée reste complexe car les effets agronomiques, économiques et environnementaux de l'application sont temporellement dissociés du moment de l'apport.
Les modèles éco-physiologiques, tels que le modèle sol-culture STICS (INRA, France – Brisson et al., 2009), permettent d'étudier les effets des interactions entre les pratiques et les conditions environnementales sur la croissance de différents genotypes (Chenu et al., 2011). Ils ont prouvé leur capacité à guider la recherche fondamentale (Semenov et al., 2007) et maintes fois démontré leur potentiel à soutenir le processus décisionnel en lien avec les problématiques environnementales. Dans ce contexte, l' objectif de cette recherche est le développement d'un outil d'aide à la décision (OAD) permettant d'optimiser le management de la fertilisation azotée du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.), en temps-réel et en répondant à des critères agro-économico-environnementaux.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les modèles de culture peuvent être utilisés pour améliorer le processus décisionnel en évaluant la probabilité qu'un résultat particulier se produise sous des pratiques et/ou des conditions données (Basso et al., 2012). Dumont et al. (2015) ont démontré comment des climats stochastiquement générés - dérivés ici de LARS-WG (Rothamsted, UK - Semenov et al., 2007) - peuvent être utilisés en entrée d'un modèle de culture pour quantifier l'incertitude qui impacte les rendements et les reliquats azotés. Sur base de ces deux sorties, un OAD permettant d'optimiser la gestion de la fertilisation N a

[2] http://www.nitrawal.be/upload_files/publications/fiches-techniques/apl-feuillet2014.pdf

été développé. Jusqu'à présent, cet OAD ne permettait qu'un management stratégique, offrant donc une optimisation à l'échelle inter-annuelle (« *What works best*»).
Afin de faire de cet OAD un outil de gestion tactique de l'azote, permettant une optimisation en temps-réel (échelle intra-annuelle), une solution originale a été développée. Elle vise à empaqueter le modèle STICS dans une série d'algorithmes qui permettent *i*) de simuler en temps-réel l'apparition des stades « redressement » (BBCH 30) et « dernière feuille » (BBCH 39), auxquels la seconde et la troisième fraction azotée sont appliquées communément en Belgique. Sur cette base, les algorithmes permettent ensuite *ii*) d'évaluer en temps-réel l'impact de différentes fractions N appliquée au stade BBCH 39 pour différentes probabilités d'occurrence climatique. L'optimisation est ensuite réalisée sur base d'une approche multi-critères (agro-économique et environnemental).
Afin de calibrer le modèle STICS, la réponse du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) a été étudiée durant 6 saisons culturales (2008-09 à 2013-14) sous 7 protocoles de fertilisation différents, faisant varier la dose totale (0 à 240 kgN/ha) et le fractionnement (2 ou 3 fractions). La méthodologie originale d'optimisation de la fertilisation a été validée au cours des deux dernières saisons, durant lesquelles la quantité d'N à apporter au stade BBCH 39 a été déterminée par l'algorithme.

APERÇU DES RÉSULTATS

Au cours des deux années de test en temps-réel (saison 2012-13 et 21013-14), les rendements de fin de saison simulés dès le stade BBCH 39 présentaient respectivement un écart de 6.5% et de 1% avec les rendements mesurés au terme des saisons.
La pratique classiquement recommandée, qui consiste à procéder à un fractionnement 60-60-60kgN/ha, ne se révèle intéressante qu'au plus une année sur deux en considérant le critère économique et les prix observés ces dernières années. Cette pratique n'aurait de sens qu'au mieux une année sur six lorsque le critère environnemental est considéré en parallèle. On estime ainsi qu'en moyenne, à l'échelle annuelle, 15 à 35 kgN/ha pourraient être économisés, respectivement selon le critère économique et économico-environnemental. Par ailleurs, l'outil offre aussi la possibilité, les "bonnes" années, de procéder à des recommandations d'azote plus importantes.
Les résultats montrent également que c'est la composante environnementale qui est le critère le plus « stable » dans la détermination de la fraction azotée optimale, tandis que le critère économique, au *prorata* des prix considérés pour l'achat de l'azote et la vente du grain, peut faire fortement fluctuer la fraction N optimale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Basso B. et al., 2012b. Biosyst. Eng. 113(2), 103-111.

Brisson N. et al., 2009. Editions Quae. Collection Update Sciences and technologies.

Chenu K. et al., 2011. J. Exp. Bot. 62, 1743-1755.

Dumont B. et al., 2015. Eur. J. Agron. 65, 10-17.

Semenov M.A. et al., 2007. Eur. J. Agron. 26(3) 283-294.

Vandenberghe C. et al., 2013. Biotechnol. Agron. Soc. Environ., 17 (S1), 301-306.

POSTERS

SIMULATION DE LA BIOMASSE ET DU PRÉLÈVEMENT EN AZOTE DE LA POMME DE TERRE DANS L'EST DU CANADA AVEC LE MODÈLE STICS

SIMULATING POTATO GROWTH AND NITROGEN UPTAKE IN EASTERN CANADA WITH THE STICS CROP MODEL

René Morissette[1], Guillaume Jégo[1], Gilles Bélanger[1], Athyna N. Cambouris[1], Judith Nyiraneza[2], Bernie J. Zebarth[3] et Morteza Mesbah[2]

[1] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec, Québec, Canada ; [2] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Charlottetown, Charlottetown, Canada ; [3] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Fredericton, Fredericton, Canada

Mots clés : Shepody, Russet Burbank, modèle de culture, indice de surface foliaire, courbe de dilution de l'azote
Keywords : Shepody, Russet Burbank, crop model, LAI, nitrogen dilution curve

INTRODUCTION

Les modèles écophysiologiques sont des outils utiles pour simuler la croissance des cultures en fonction de plusieurs facteurs environnementaux et pratiques agricoles (Boote et al., 1996). Pour la pomme de terre (*Solanum tuberosum L.*), l'azote (N) est un stress abiotique important qui influe sur la croissance, le développement, la qualité et le rendement des tubercules (Ojala et al., 1990). La courbe de dilution critique de l'azote permet de définir la concentration minimale en azote en dessous de laquelle la croissance de la plante est ralentie à cause d'un stress azoté. Des études antérieures ont montré que certains cultivars de pomme de terre présentaient des courbes spécifiques (Bélanger et al., 2001, Giletto et Echeverría, 2015), mais l'effet de ces spécificités sur la performance des modèles de culture pour simuler la biomasse et le prélèvement en N n'a jamais été évalué. Les objectifs de cette étude étaient i) de calibrer et de valider le modèle STICS (V8.41) pour les cultivars Shepody (déterminée, maturité à mi-saison) et Russet Burbank (indéterminée, maturité tardive) sous les conditions de l'est du Canada et ii) d'évaluer si l'utilisation d'une courbe de dilution critique de N spécifique au cultivar telle que défini par Bélanger et al. (2001) au lieu de la courbe générique proposée par Duchenne et al. (1997) améliore la performance du modèle pour simuler la biomasse et le prélèvement en N pour les deux cultivars d'intérêt.

DONNÉES ET PROCÉDURE DE CALIBRATION ET DE VALIDATION

Les données comprenaient des mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la biomasse des tubercules et de la biomasse totale (tubercules + biomasse aérienne), et de la quantité d'azote des tubercules et de la biomasse totale pour plusieurs doses de fertilisation azotée (0 à 280 kg N ha^{-1}) recueillies sur des sites expérimentaux à Charlottetown (PE), Fredericton (NB), et Québec (QC), Canada. La calibration a été effectuée en minimisant les écarts entre les variables simulées et les observations d'un jeu de données de Charlottetown pour Shepody et de Québec pour Russet Burbank. Toutes les autres données ont été utilisées pour évaluer la performance du modèle. Au total, 34 paramètres plantes ont été calibrés simultanément pour les deux cultivars. Les seules différences de paramétrage entre les deux cultivars provenaient du choix de formalisme de croissance (déterminée pour Shepody et indéterminée pour Russet Burbank), des paramètres cultivars (10 paramètres) et des courbes de dilution critiques. La concentration critique d'azote dans la plante N_c est exprimée par $N_c = aW^{-b}$, où W est la biomasse totale. Les paramètres a=5.04 et b=0.42 ont été utilisés pour Shepody et a=4.57 et b=0.42 pour Russet Burbank (Bélanger et al, 2001). L'effet de l'utilisation de courbes de dilution spécifiques pour chaque cultivar a été évalué en comparant la performance du modèle avec celle

obtenue en utilisant les paramètres par défaut dans le modèle (*a*=5.21 et *b*=0.56, Duchesne et al (1997)).

RÉSULTATS

Les résultats de la validation du modèle montrent que pour Shepody, l'utilisation des courbes de dilution de N spécifiques n'avait pas d'effet important sur la simulation de la biomasse totale et de la biomasse des tubercules par rapport à l'utilisation d'une courbe générique (*normalized root mean square error* [NRMSE] entre 28% et 30 %). Par contre, il y avait une amélioration nette de la performance du modèle pour la simulation de la quantité de N dans la biomasse totale (NRMSE 20 % vs 32 %) et dans les tubercules (NRMSE 24 % vs 38 %). Pour Russet Burbank, cet effet sur la simulation de la biomasse était également faible avec des variations de NRMSE entre 26 % et 30 %. Comme pour Shepody, l'effet était plus important pour la simulation de la quantité de N dans la biomasse totale (NRMSE 37 % vs 40 %) et dans les tubercules (NRMSE 50 % vs 63 %) avec cependant une dispersion des données observées – simulées plus importante que pour Shepody. Dans l'ensemble, les performances de validation du modèle pour Shepody et Russet Burbank sont bonnes et comparables à celles d'autres études Nord-Américaines de modélisation de la pomme de terre. La performance du modèle est généralement meilleure pour la simulation de la biomasse que pour celle de la quantité de N dans la biomasse et que pour le LAI. Les erreurs de prédiction du modèle sont principalement liées à la dispersion des données plutôt qu'à des biais systématiques.

CONCLUSION

L'utilisation de courbe de dilution de N spécifique améliore l'estimation du prélèvement en N, mais n'a que peu d'impact sur la simulation de la biomasse. D'autres études seront prochainement réalisées pour évaluer la qualité de simulation d'autres variables du bilan azoté telles que le lessivage des nitrates et leur concentration dans le sol.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bélanger, G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn, et N. Ziadi. 2001. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in eastern Canada. Am. J. Potato Res. 78:355–364.

Brisson, N., M. Launay, B. Mary, and N. Beaudoin. 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quae, Versailles.

Duchenne, T., J.M. Machet, et M. Martin. 1997. Potatoes. Dans: G. Lemaire, editor, Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer-Verlag, Berlin. p. 119–130.

Giletto, C.M., et H.E. Echeverría. 2015. Critical nitrogen dilution curve in processing potato cultivars. Am. J. Plant Sci. 6:3144–3156.

Ojala, J.C., J.C. Stark, et G.E. Kleinkopf. 1990. Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality. Am. Potato J. 67:29–43.

COMPARAISON DE MODÈLES DE SIMULATION DE LA FLÉOLE DES PRÉS EN CLIMAT NORDIQUE

INTERCOMPARISON OF MODELS FOR SIMULATING TIMOTHY YIELD IN NORTHERN COUNTRIES

Guillaume Jégo[1], Panu Korhonen[2], Taru Palosuo[2], Mats Höglind[3], Tomas Persson[3], Marcel Van Oijen[4], Anne-Maj Gustavsson[5], Perttu Virkajärvi[2], Gilles Bélanger[1]

[1] Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC), Canada ; [2] Natural Resources Institute Finland (Luke), Finland ; [3] Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO), Norway ; [4] The Centre for Ecology & Hydrology (CEH), UK ; [5] Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Sweden

Mots clés : STICS, CATIMO, BASGRA, rendement
Keywords : STICS, CATIMO, BASGRA, yield

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, plusieurs études de comparaison de modèles de cultures ont été publiées, notamment pour les céréales. Les initiatives AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project; www.agmip.org) et MACSUR (www.macsur.eu) ont utilisés la comparaison de modèles pour mieux identifier les faiblesses des modèles qui pouvaient limiter leur performance, notamment pour évaluer les impacts des variations climatiques sur le rendement des cultures et les bilans environnementaux des systèmes agricoles. Concernant les plantes fourragères, relativement peu d'études de comparaison de modèles ont été effectuées, et aucune pour la fléole des prés (*Phleum pratense* L.) qui est pourtant l'une des principales graminées fourragères pérennes cultivées dans les zones à climat nordique en Amérique du nord et en Europe du nord.
L'objectif de cette étude était de comparer la performance de trois modèles (BASGRA, CATIMO et STICS) pour simuler le rendement de la première et de la deuxième coupe de la fléole des prés en utilisant des données expérimentales incluant plusieurs cultivars et une grande diversité de conditions climatiques, types de sol et pratiques culturales. Ces données couvraient les principales zones de production de la fléole des prés au Canada et en Europe du nord. La performance des trois modèles a été évaluée après une calibration générique (incluant tous les cultivars) et une calibration spécifique pour chaque cultivar.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les trois modèles utilisés pour la comparaison sont CATIMO (Canadian Timothy Model; Bonesmo et Bélanger 2002), BASGRA (BASic GRAssland model; Höglind et al. 2001; Van Oijen et al. 2005; Höglind et al. 2016), et STICS (Brisson et al., 2008; Jégo et al. 2013). Les données expérimentales provenaient de sept sites localisés au Canada et en Europe du nord. Pour chaque site, les données couvraient deux à trois saisons de croissance pour un total de 33 unités de simulation (USM) différentes incluant aussi des doses variables de fertilisations en azote et des dates de premières et deuxièmes coupes plus ou moins hâtives.
Deux types de calibration des paramètres « plantes » des modèles ont été effectués : une calibration générique incluant tous les cultivars et une calibration cultivar-spécifique. Au total 24 USMs ont été utilisées pour la phase de calibration (générique et cultivar-spécifique) et 9 USMs pour la phase de validation. Les données d'entrée suivantes étaient disponibles pour chaque site : données climatiques journalières (températures minimum et maximum, précipitation, radiation solaire, vitesse du vent et humidité relative), pratiques culturales (dates des coupes, dates et doses des apports de fertilisants azotés) ainsi que les propriétés de sol (texture, teneur en matière organique, densité apparente, humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement). La performance des modèles pour

simuler le rendement en matière sèche a été évaluée pour les premières et deuxièmes coupes en utilisant les deux méthodes de calibration.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les trois modèles permettaient d'estimer correctement la dynamique de la croissance de la fléole des prés bien qu'ils aient une tendance à légèrement sous-estimer le rendement de la première coupe et à surestimer celui de la deuxième coupe. La calibration cultivar-spécifique a permis d'obtenir de meilleurs résultats que la calibration générique pour la première coupe avec des RMSE (root mean square error) plus faibles pour BASGRA (120 vs. 178 g m^{-2}), CATIMO (113 vs. 168 g m^{-2}), et STICS (87 vs. 126 g m^{-2}). Pour la deuxième coupe, l'effet de la méthode de calibration était moins marqué avec une légère amélioration due à la calibration cultivar-spécifique pour BASGRA (73 vs. 87 g m^{-2}) et STICS (92 vs. 104 g m^{-2}), mais une détérioration pour CATIMO (190 vs. 142 g m^{-2}).
La meilleure performance de STICS en première coupe avec une RMSE plus faible que BASGRA et CATIMO semble être le fait d'une meilleure simulation de la réponse à différentes doses de fertilisation azotée. Ce résultat pourrait être la conséquence de la simulation plus détaillée des processus du sol dans STICS que dans BASGRA et CATIMO. Les gains de performance généralement obtenus avec la méthode de calibration cultivar-spécifique par rapport à la calibration générique confirment qu'il existe suffisamment de variation au sein des cultivars de fléole des prés pour justifier ce type d'approche. Enfin, la tendance des modèles à sous-estimer le rendement de la première coupe et à surestimer celui de la deuxième pourrait indiquer que les processus impliqués dans le regain après la coupe ne sont pas parfaitement intégrés dans les modèles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bonesmo, H., & Bélanger, G. (2002). Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model. Agronomy Journal, 94, 337-345.

Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2008). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Éditions QUAE, Versailles, France.

Höglind, M., Schapendonk, A., & Van Oijen, M. (2001). Timothy growth in scandinavia: Combining quantitative information and simulation modelling. New Phytologist, 151(2), 355-367.

Höglind, M., Van Oijen, M., Cameron, D., & Persson, T. (2016). Process-based simulation of growth and overwintering of grassland using the BASGRA model. Ecological Modelling 335, 1-15.

Jégo, G., Bélanger, G., Tremblay, G.F., Jing, Q., & Baron, V.S. (2013). Calibration and performance evaluation of the STICS crop model for simulating timothy growth and nutritive value. Field Crops Research 151, 65–77.

van Oijen, M., Höglind, M., Hanslin, H. M., & Caldwell, N. (2005). Process-based modeling of timothy regrowth. Agronomy Journal, 97, 1295-1303.

COURBE DE DILUTION CRITIQUE DE L'AZOTE POUR L'OPTIMISATION DE LA GESTION AZOTÉE DE LA PRODUCTION DE BLÉ DUR EN PLUVIAL SOUS L'AGRICULTURE DE CONSERVATION DANS LES RÉGIONS SEMI-ARIDES DE LA TUNISIE

CRITICAL NITROGEN DILUTION CURVE FOR OPTIMIZING NITROGEN MANAGEMENT OF RAINFED DURUM WHEAT PRODUCTION UNDER CONSERVATION AGRICULTURE IN SEMI-ARID AREA OF TUNISIA.

Amir Souissi[1, 2], Mohamed Annabi[1], Salah Ben Youssef[1], Hatem Cheikh M'hamed[1], Haithem Bahri[3], Mohamed Chakroun[1]

[1]Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie, Ariana, Tunisie ; [2]Institut National Agronomique de Tunisie, Tunis, Tunisie ; [3]Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts, Ariana, Tunisie

Keywords : Conservation agriculture, Conventional system, N-fertilization, durum wheat, Tunisia
Mots clés : Agriculture de conservation, Système conventionnel, Fertilisation azoté, blé dur, Tunisie

INTRODUCTION

Among all cultivated wheats, Durum wheat is a minor crop, grown on only 8 to 10% of all the wheat cultivated area is the most important cereal crop in world. Average harvested area, total production and grain yield of wheat in Tunisia in 2013 was the 516 000 ha, 0.97 million tons, and 1.89 t ha-1, respectively (Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015).
In Tunisia, cereal production is grown yearly on over 1.2 million hectares and constrained by unsustainable cropping practices, particularly repeated plowing, which result in loss of soil fertility (Angar *et al.*, 2010). Conservation agriculture (CA) is a cropping system allows to alleviate the negative impact of plowing on soil quality since the CA is based on direct drilling of seeds, permanent mulching and appropriate agronomic sequences (Ben-Hammouda *et al.*, 2009). Moreover, nitrogen (N) management in rain-fed wheat under conventional system (CV) is considered one of the most important limiting production factor, which many studies are done to improve the N-fertilization practice.
In Mediterranean climate regions, the amount and timing of rainfall during the growing season varies considerably, which increases the risk associated with applying N. The time and rate of N application should be managed to reflect this rainfall variability. Nevertheless, N-fertilization under CA is different from its under conventional system. In fact, stubble decomposition in CA system tends to tie-up or immobilise soil N and surface-applied N (Havlin *et al.*, 2013). Thus, N-fertilization strategies must be fine-tuned to fit specific requirement of crops under CA management in order to avoid N deficiency. The aim of the current study was to determine the critical N dilution curve for durum wheat in Tunisia cultivated under CA using two-year experiments testing five N-rates (0 to 140 kg N/ha).

THE IMPLEMENTATION OF CRITICAL NITROGEN DILUTION CURVE FOR RAINFED DURUM WHEAT UNDER CA SYSTEM:

The results demonstrate that the critical N-dilution curve for durum wheat for the both systems were statistically similar and described by the equations $N_c = 3.38\ DM^{-0.38}$ and $N_c = 3.09\ DM^{-0.36}$ respectively for CV and CA when aboveground biomass was between 1 and 11 T DM ha-1. The models accounted for 82% and 70% of the total variance, respectively for CV and CA.

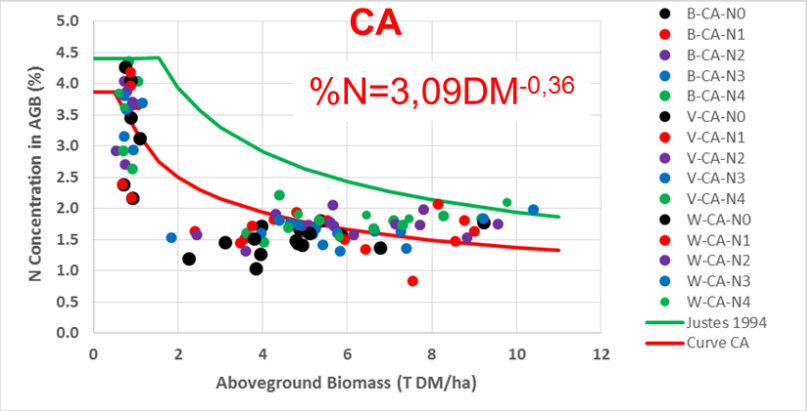


Figure 1 : Nitrogen dilution curves of Durum wheat experiment: experimental data and critical curves (red solid curve for CA and green solid curve for Justes *et al.* (1994)).
This result extracted from figure 1 allows us to calibrate nitrogen module in STICS model (Brisson *et al.*, 1998) with Tunisian conditions might offer model users and scientists a great opportunity to achieve modelling of Nitrogen nutrition of Durum wheat in a conservation system under semi-arid conditions of Tunisia.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

Angar H., Ben Haj Salah H., Ben-Hammouda M. Semis direct et semis conventionnel en Tunisie : les résultats agronomiques de 10 ans de comparaison. In : Bouzerzour H. (ed.), Irekti H. (ed.), Vadon B. (ed.). 4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT, 2011. p. 53-59 (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 96)

Ben-Hammouda M, M'Hedhbi K, Cheikh M'Hamed H, Ghouili, H., 2009. Direct drilling is behind agronomy of opportunity in Tunisia. Proceedings of the Fourth World Congress on Conservation Agriculture, New Delhi, India.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). FAOSTAT Database. Rome, Italy: FAO. Retrieved December 30, 2015 from http://faostat3.fao.org/home/E

Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D., 2013. Soil Fertility and Fertilizers, 8 edition. ed. Pearson, Upper Saddle River, NJ u.a.

Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Machet, J.-M., Thelier-Huche, L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. Ann. Bot. 74, 397–407. doi:10.1006/anbo.1994.1133

Nadine Brisson, Bruno Mary, Dominique Ripoche, Marie Hélène Jeuffroy, Françoise Ruget, Bernard Nicoullaud, Philippe Gate, Florence Devienne-Barret, Rodrigo Antonioletti, Carolyne Durr, Guy Richard, Nicolas Beaudoin, Sylvie Recous, Xavier Tayot, Daniel Plenet, Pierre Cellier, Jean-Marie Machet, Jean Marc Meynard, Richard Delécolle, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18, 311–346. doi:10.1051/agro:19980501

UTILISATION DES FORMALISMES DE STICS DANS UN MODÈLE DE SOL SPATIALISÉ DESTINÉ À LA SIMULATION INDIVIDU-CENTRÉE DE PEUPLEMENTS HÉTÉROGÈNES

REUSING STICS SOIL FORMALISMS IN A 3D SOIL MODEL DEVELOPED FOR INDIVIDUAL-BASED MODELS OF PLANT COMMUNITIES

Gaëtan Louarn, Jean-Louis Durand, Lucas Faverjon, Vincent Migault, Abraham Escobar-Gutiérrez, Didier Combes

Inra UR4 P3F, F86600 Lusignan, France

Mots clés : modèle de sol ; bilan hydrique ; bilan d'azote ; couplage sol-plante
Keywords : soil model; water balance; nitrogen balance; plant-soil coupling

INTRODUCTION

Les modèles individu-centrés de communautés végétales sont de plus en plus utilisés en agronomie et en écologie (Louarn et al., 2014). Toutefois, contrairement à leurs homologues modèles de cultures, ils ne considèrent généralement pas l'effet de facteurs environnementaux multiples tels que la lumière, l'eau ou l'azote minéral du sol. Un point limitant à ces développements reste notamment la possibilité d'utiliser facilement des modèles de sol robustes spatialement explicites comme c'est déjà possible dans les calculs d'interception du rayonnement. Dans cette étude, nous présentons et réalisons une première évaluation d'un modèle de sol développé à cet effet sur la plateforme OpenAlea et adapté du modèle STICS.

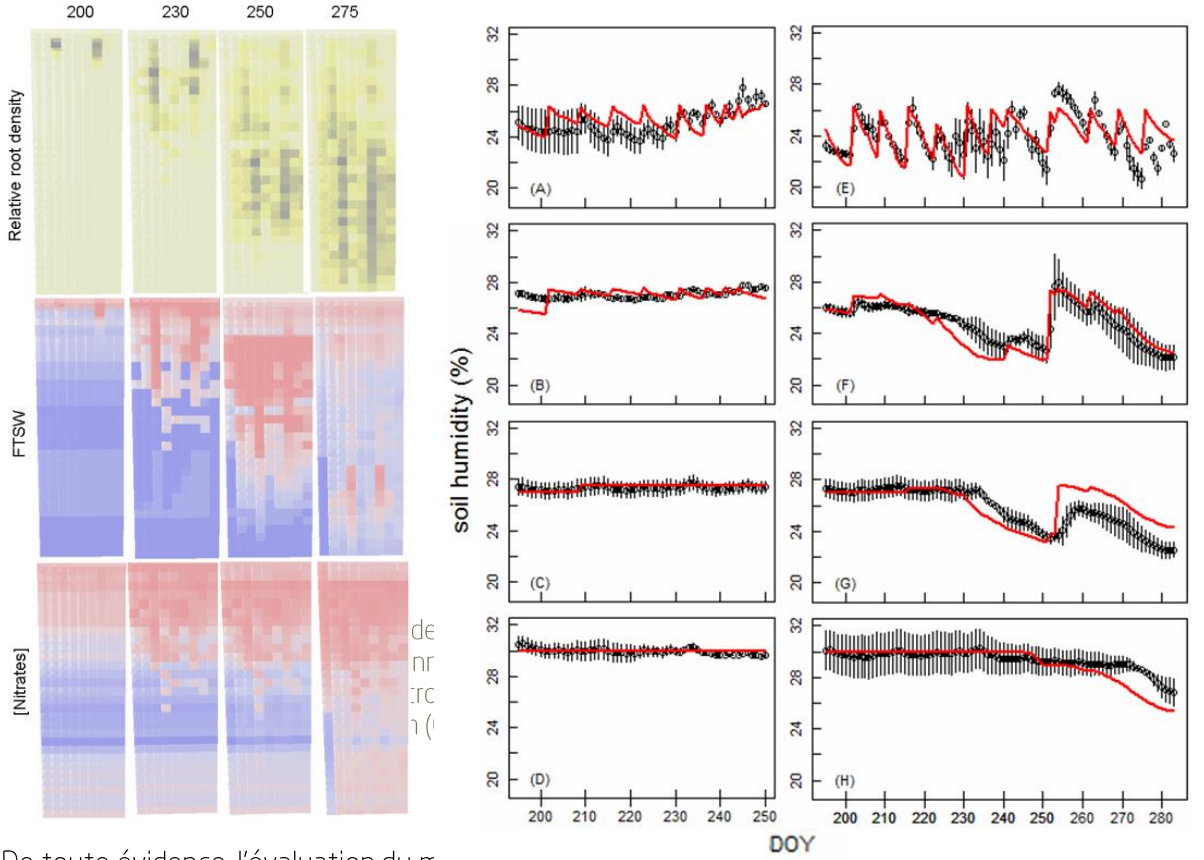
MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le modèle «3DS» est une généralisation à des grilles de voxels en 3D du module de sol 1D de STICS (Louarn et al., 2016). Les principaux éléments du bilan hydrique (évaporation du sol, transpiration), du bilan azoté (minéralisation de la matière organique, minéralisation/organisation des résidus, nitrification, dénitrification) et des transferts verticaux de masse (cellules de mélange) et d'énergie (température de sol) reprennent les formalismes et paramètres de STICS. L'extension aux grilles 3D se fait sur l'hypothèse d'une dominance des transferts verticaux dans le sol par rapport aux transferts latéraux entre cellules (multi-1D). Le couplage avec les modèles individu-centrés de plante s'effectue i) en distribuant les densités de longueur racinaire des plantes individuelles dans la grille 3D de sol, ii) en partageant les demandes en eau et en azote de chaque plante en fonction de leur interception de rayonnement et iii) en résolvant à l'échelle de chaque voxel le partage entre plantes des prélèvements d'eau et d'azote sur la base d'une compétition localement symétrique (i.e. fonction des densité de longueur pour l'eau et des capacité spécifiques d'absorption pour l'N minéral).
Une première évaluation de ce modèle est en cours de réalisation. A ce stade, elle a consisté 1) en un test de non régression conduit sur une série d'usm de sol nu de Lusignan et Mons et 2) en la simulation d'un essai en rhizotron de grande capacité (50*22*150 cm) implanté avec un couvert hétérogène (luzerne / sol nu, puis luzerne / fétuque). Dans ce dernier cas, les entrées « plante » du modèle (distribution spatiale des densités racinaires, interception de rayonnement) étaient forcées sur la base de mesures afin de focaliser l'évaluation sur le module de sol.

RÉSULTATS

Les premiers résultats de non régression montrent que le modèle se comporte globalement en 1D comme attendu par rapport aux simulations de la version standard de STICS, avec toutefois des différences légères dans les transferts verticaux (lixiviation) liés à la discrétisation différente du sol.

Concernant l'expérimentation en rhizotrons, les prédictions des variations spatio-temporelles d'humidité du sol sont globalement bonnes, même si le modèle tend à surestimer les prélèvements d'eau en profondeur par le front racinaire (Fig. 1). Les résultats concernant la distribution spatiale de l'N minéral sont moins bons. Ceux-ci ne portent cependant encore que sur 1 seule date de mesure.



De toute évidence, l'évaluation du modèle "3DS" doit se poursuivre, notamment en ce qui concerne le fonctionnement azoté du sol et le partage de ressources entre plantes. Un intérêt considérable de cette approche est de pouvoir mobiliser les paramétrages de sols de STICS existants pour diverses situations pédo-climatiques afin de simuler le fonctionnement de cultures spatialement hétérogènes (e.g. dynamiques des patchs de différentes espèces en prairie, agroforesterie).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Louarn G, Escobar-Gutiérrez A, Migault V, Faverjon L, Combes D. 2014. 'Virtual grassland': an individual-based model to deal with grassland community dynamics under fluctuating water and nitrogen availability. In: The Future of European Grasslands, A. Hopkins, R. P. Collins, M. D. Fraser, V. R. King, and D. C. Lloyd (Eds), Grassland Sci. Eur., Vol 19, pp. 242-244.

Louarn G, Faverjon L, Migault V, Escobar-Gutiérrez A, Combes D. 2016. Assessment of '3DS', a soil module for individual-based models of plant communities. In: IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA), Qingdao, pp. 125-132. doi: 10.1109/FSPMA.2016.7818298

UTILISATION DE LA SIMULATION INFORMATIQUE POUR L'ÉVALUATION BIO-ÉCONOMIQUE DE SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS

USING CROP SIMULATION FOR BIO-ECONOMIC EVALUATION OF INNOVATIVE CROPPING SYSTEMS.

Hélène Raynal[1],*, Hélène Salva[3], Eric Casellas[1], Patrick Chabrier[1], Stéphane Couture[1], Karim Chaïb[3], Jacques-Eric Bergez[2],

[1]Inra, UR0875 MIAT, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; [2]Inra, Université Toulouse, INPT, UMR1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France ; [3]: INPT-EI PURPAN, Université Toulouse, UMR1248 AGIR, 75 voie du TOEC F-31076 TOULOUSE, France

Mots clés : Décision ; conduite des cultures ; modélisation ; évaluation bio-économique.
Keywords : Decision; crop management; modeling; bio-economic evaluation.

INTRODUCTION

Différents projets de recherche visent à concevoir et à évaluer des systèmes de culture innovants répondant aux enjeux actuels de durabilité économique, environnementale et sociétale. Ces projets s'appuient sur des essais expérimentaux et certains mobilisent la simulation informatique pour tester la robustesse des résultats sous différentes conditions pédo-climatiques. Peu de projets cherchent à évaluer le potentiel d'adoption de ces systèmes innovants par les agriculteurs. C'est l'objectif du travail que nous présentons ici. Il est basé sur la conception d'un modèle couplé (bio-physique, décision), son utilisation pour produire des résultats qui sont ensuite exploités par un modèle bio-économique. Cette approche générique a été appliquée aux essais expérimentaux sans utilisation de pesticides (Essais « Opesticide » des unités expérimentales d'Auzeville-Tolosane (INRA) et de Lamothe (INPT PURPAN, Toulouse)).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le modèle couplé : Nous avons conçu un modèle couplé permettant de simuler les processus biophysiques, les processus de décision et leurs interactions. STICS a été utilisé compte-tenu de sa capacité à simuler les différentes espèces des essais expérimentaux de l'étude. La simulation des décisions opérationnelles prises par l'agriculteur pour la mise en œuvre de l'itinéraire technique est basée sur un modèle de décision développé en utilisant le cadre de modélisation de la décision de la plate-forme RECORD (Bergez et al. 2013). Il offre un utilitaire permettant de définir les activités (opérations culturales de l'itinéraire technique), l'ordonnancement entre ces activités et les règles de décision déclenchant chaque activité (Bergez et al. 2016). Ce modèle de décision a été ensuite couplé en utilisant la version STICS disponible sous RECORD (Bergez et al. 2014).
Des essais expérimentaux au modèle : Afin de formaliser les itinéraires techniques (en particulier les règles de décision) sous une forme compatible avec une implémentation informatique sur RECORD, des ateliers de travail ont été organisés entre les responsables des essais expérimentaux et les modélisateurs du projet. Ils ont permis de spécifier les itinéraires techniques sous la forme de fiches « tableur excel », traduites automatiquement en code informatique, exploitable en tant que donnée d'entrée du simulateur. Une fiche a été faite pour chaque système innovant « Opesticide », et son témoin dit « conventionnel ».
Le modèle bio-économique : Il est basé sur une fonction d'utilité multi-attributs qui permet d'estimer le niveau de satisfaction de l'agriculteur envers un système de culture donné (Ridier et al. 2015). Les attributs sont les caractéristiques qui intéressent l'agriculteur (ex marge brute, niveau d'érosion du

sol ...). L'utilité est calculée pour chaque système de culture conventionnel et son correspondant innovant (« Opesticide »). En comparant les utilités obtenues, on estime le potentiel d'adoption du système « Opesticide ». Pour tenir compte de la variabilité inter-annuelle des performances des systèmes, les simulations ont été réalisées sur 30 années (1995-2015, données SAFRAN).

RÉSULTATS

L'approche a permis de calculer différents attributs : économiques (ex Marge brute, Fig. 1), environnementaux et sociaux (ex Charge de travail, Fig. 2)) pouvant être pris en considération par un agriculteur quant à son choix de passer à un système sans pesticides. La simulation informatique à partir d'un modèle couplé biophysique/décision a permis de mettre en évidence la variabilité inter-annuelle i) de ces attributs (Fig. 1 et 2), et ii) de l'itinéraire technique (dans le cas de la Fig. 2, le temps de travail est lié au nombre de désherbages mécaniques qui varie suivant les années). Dans le cadre de cette étude, les systèmes conventionnels montrent une utilité supérieure aux systèmes « Opesticide ». Cependant les deux cas présentés (Table 1) montrent que la différence est plus ou moins élevée. Ainsi, le maïs « Opesticide » montre une utilité légèrement inférieure à celle du maïs conventionnel (-54), ce qui permet de d'avancer l'hypothèse qu'il serait plus facilement adopté par les agriculteurs, que le système de culture innovant visant à remplacer le système conventionnel Blé dur/Tournesol (-126).

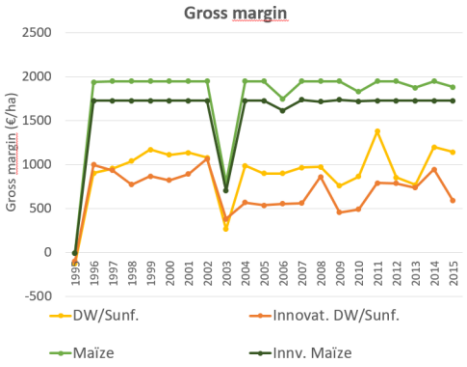


Figure 1 : Marges brutes simulées pour les systèmes : 1) BléDur/Tournesol conventionnel, et système «Opesticide» correspondant, 2) Maïs conventionnel et système «Opesticide» correspondant

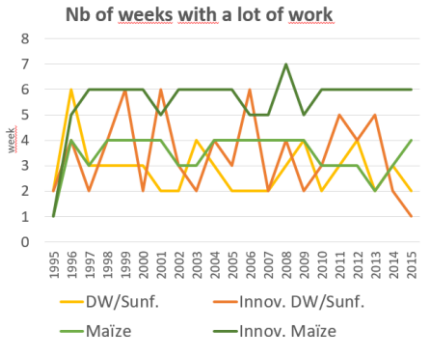


Figure 2 : Nombre de semaines dans l'année où le temps de travail requis pour un système de culture est élevé.

Table 1 : Utilité moyenne calculée pour les systèmes de culture 1) BléDur-Tournesol conventionnel, et système « Opesticide » correspondant, 2) Maïs conventionnel et le système «Opesticide» correspondant

Cropping System	Utility (€/ha)
Convent. :Durum Wheat/Sunflower	894
Innovat.: 0 pesticides + rotation with several crops	768
Convent. : Maïze	1721
Innovat. : 0 pesticide + several crops	1667

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet MARKIZ (Markets for Sustainable Innovative cropping systems with zero pesticides) soutenu par la fondation Daniel & Nina Carasso.

RÉFÉRENCES

J.-E. Bergez, P. Chabrier, C. Gary, M.H. Jeuffroy, D. Makowski, G. Quesnel, E. Ramat, H. Raynal, N. Rousse, D. Wallach, P. Debaeke, P. Durand, M. Duru, J. Dury, P. Faverdin, C. Gascuel-Odoux, F. Garcia, 2012, An open platform to build, evaluate and simulate integrated models of farming and agro-ecosystems, Environmental Modelling & Software, Volume 39, January 2013, Pages 39-49, ISSN 1364-8152, 10.1016/j.envsoft.2012.03.011.

J.E. Bergez, H. Raynal, M. Launay, N. Beaudoin, E. Casellas, J. Caubel, P. Chabrier, E. Coucheney, J. Dury, I. Garcia de Cortazar-Atauri, E. Justes, B. Mary, D. Ripoche, F. Ruget, Evolution of the STICS crop model to tackle new environmental issues: New formalisms and integration in the modelling and simulation platform RECORD, Environmental Modelling & Software, Volume 62, December 2014, Pages 370-384, ISSN 1364-8152.

Bergez J-E. , Raynal H., Joannon A., Casellas E., Chabrier P., Eric Justes E., Quesnel G., Véricel G. 2016, The new graphical decision plugin of the modeling and simulation platform RECORD to design and test innovative crop management, Agronomy Sustainable Development (2016) 36:19

Ridier A., Chaïb K., Roussy., 2015. A dynamic stochastic programming model of crop rotation choice to test the adoption of long rotation under price and production risks. European Journal of Operational Research, vol. 252, Issue 1, July 2016, Pages 270–279.

ANALYSE COMPARATIVE DE L'IMPACT DES PRATIQUES AGRICOLES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'AUNIS À PARTIR DES DEUX MODÈLES STICS ET SYST'N

COMPARATIVE STUDY ABOUT FARMING PRACTICALS IMPACTS ON WATER QUALITY IN THE AUNIS WATERGROUND CATCHMENT AREA USING THE TWO SYSTN AND STICS MODELS

Jean-Philippe BERNARD

Chambre d'agriculture de la Charente-Maritime, La Rochelle, France

Mots clés : lessivage de l'azote, raisonnement de l'azote, SYSTN, STICS, bassin versant
Keywords : Nitrates leaching, Nitrogen management, SYSTN, STICS, catchment area

INTRODUCTION

Le bassin versant d'Aunis, dont les productions principales sont les céréales et les oléo-protéagineux, fournit une partie de la ressource en eau de la ville de La Rochelle. Cette ressource importante fait l'objet d'un suivi des contaminants, dont les nitrates agricoles.
Depuis plus de dix ans, la ville de La Rochelle et la Chambre d'agriculture de Charente-Maritime élaborent des programmes d'action pour proposer aux agriculteurs de la région de prévenir le lessivage de l'azote. Mais aujourd'hui, il est nécessaire d'offrir aux partenaires de cette opération des informations plus précises pour faciliter l'amélioration des pratiques agricoles en ce qui concerne la qualité de l'eau.
C'est pourquoi il a été décidé d'associer deux outils de modélisation, SYSTN et STICS, pour obtenir une vue complète des flux d'azote entre les cultures, le sol et l'eau pendant tout le cycle de développement des cultures.

CARACTÉRISATION AGROLOGIQUE ET CLIMATOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

La première étape consiste à obtenir un aperçu à l'échelle du bassin versant des caractéristiques des sols à partir des cartes provenant de la cartothèque IGCS et de la situation climatologique. Cette étude permet de tester les modèles avec des simulations utilisant les sols principaux de la zone et les principales rotations de cultures.
Les références obtenues en matière de stade phénologique, alimentaire et de production serviront de cadre de référence pour l'étude des cas réels.

ANALYSE DES RÉSULTATS DE STICS ET DE SYSTN SUR CINQ CAS DE SUCCESSION CULTURALE IDENTIFIÉE SUR LE BASSIN VERSANT.

La deuxième étape est l'utilisation des deux modèles avec cinq cas réels de parcelles dont le profil du sol et le mode de gestion des cultures sera précisément décrit par l'exploitant.
Cette étape permettra de quantifier les flux d'azote avec des résultats proches de la réalité de terrain, ce qui devrait avoir un effet pédagogique pour les agriculteurs par la visualisation de ces flux.
Le choix de l'utilisation des deux modèles a été conçu pour avoir la possibilité de confronter les résultats de SYST'N et STICS sur le lessivage de l'azote, d'avoir une bonne précision dans l'évaluation des flux d'azote par SYST'N et d'obtenir l'analyse agronomique correspondante avec STICS – ce qui crédibilise la démarche d'étude d'impact auprès des agriculteurs.

APPROCHE STOCHASTIQUE BAYÉSIENNE DE L'ASSIMILATION DU LAI DÉRIVÉ DES OBSERVATIONS SATELLITES DANS STICS

A STOCHASTIC BAYESIAN APPROACH TO ASSIMILATE SATELLITE DERIVED LAI INTO STICS CROP MODEL

Morteza Mesbah[1], Elizabeth Pattey[2], Guillaume Jégo[3], Jiangui Liu[2], Samuel Buis[4], and Patrice Lecharpentier[4]

[1]Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Charlottetown, Canada ; [2]Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement d'Ottawa, Canada ; [3]Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec, Canada ; [4]Institut national de la recherche agronomique, UMR1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

Mots clés : DREAM, Simplex, assimilation du LAI, STICS, Observation de la Terre.
Keywords : DREAM, Simplex, assimilation of LAI, STICS, Earth observation.

INTRODUCTION

The assimilation of leaf area index (LAI) derived from Earth observation (EO) data is an effective approach to improve yield predictions. Assimilation can be done by re-initializing some input parameters, which are not readily available (Guérif et al. 2006; Jégo et al. 2015). The performance of assimilation techniques are, however, affected by uncertainities associated with data. Here, we account for such uncertainties using a state-of-art Bayesian data assimilation method and assimilate EO derived LAI into the STICS model and evaluate the uncertainiy associated with predicted key model inputs, i.e., seeding date and density, and soil moisture at field capacity.

MATERIAL AND METHODS

Study was conducted in a small experimental farm in Ottawa (ON, Canada), planted with soybean, corn, and spring wheat during 1999 to 2010. The simulation units were obtained by overlaying the field boundaries to soil map. EO data were aquired from various sources: 3 to 9 images for 1999 to 2008 from multi-spectral images (Landsat or SPOT) and airborne hyperspectral images (CASI); 13 images for 2010 from multi-spectral Formosat-2. LAI was retrived from MTVI2 (Haboudane et al., 2004) and EVI2 (Huete, 2002) derived from the EO data (Liu et al. 2012).

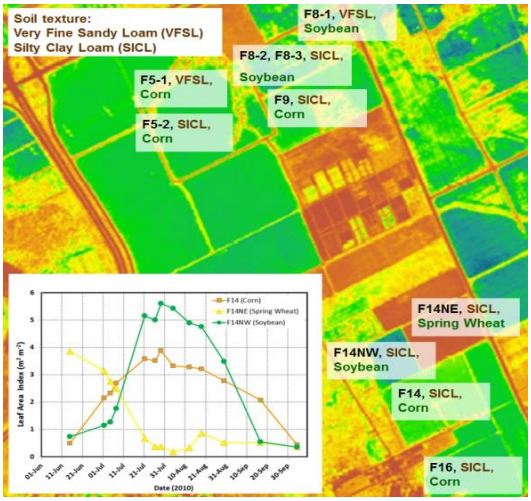


Figure 1: Information on soil texture, crops, and field locations. LAI extracted from Formosat-2 images in 2010 are also illustrated for 3 fields.

We used the OptimSTICS package (Wallach et al., 2011) to optimize input parameters of the STICS model. The optimization techniques evaluated in this study were: 1) the Nelder-Mead Simplex with 1 starting points for optimized parameters, 2) the Nelder-Mead Simplex with 10 randomly assigned starting points for optimized parameters (Simplex-10), and 3) a stocastic Baysian approach, i.e., Differential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) (Vrugt et al. 2008).

RESULTS

While the performance of the three methods were similar in yield prediction (RMSE of 17% and ME of 7%), their performance in estimation of key model inputs were different. For example, the RMSE and ME of predicted field capacity by Simplex were 29% and 26%, respectively, which were reduced by about 5% under DREAM and Simplex-10 approaches. While the Simplex-10 and DREAM are two different approaches to optimize parameters, their predictions were in good agreement (Table 1).

Table 1 : Predicted yield and model inputs by Simplex-10 and DREAM approach in field 14 (CFIA, Ottawa)

		Yield (t ha^{-1})			Optimized inputs					
		Measured	Predicted		Seeding date		Seeding density		Field capacity (%g)	
Year	Crop		DREAM	Simplex-10	DREAM	Simplex-10	DREAM	Simplex-10	DREAM	Simplex-10
2002	Corn	7.4	6.6	6.6	125	126	7	7	27	28
2003	Spring wheat	4	3.9	3.9	120	118	343	328	24	24
2005	Spring wheat	3.6	3.0	3.3	120	119	381	321	30	28
2006	Corn	8.3	8.8	8.8	128	121	7	7	24	24
2007	Spring wheat	2.7	2.5	2.7	137	132	303	300	32	31
2008	Soybean	3.5	2.5	2.7	152	147	50	50	31	25
2010	Corn	8.9	7.5	7.5	128	130	7	8	31	32

Simplex-10 starts the search from different starting points and reduces the chance of stopping at a local minimum. On the other hand, the DREAM approach starts the search from a distribution of parameters and updates the distribution as it searches through the parameter space. The run time of Simplex-10 was 10 times more than the Simplex with 1 starting point, and about half of the run time of the DREAM with a sampling size of 2000. Although the DREAM approach is more costly, it provides additional information such as correlation coefficients between parameters. These coefficients were generally small (Table 2), which indicates in most cases the EO derived LAI were sufficient to independently optimize the three parameters.

Table 2 : Correlation coefficient between model inputs predicted by the DREAM approach in field 14

Year	Crop	Seeding date & seeding density	Seeding density & field capacity	Seeding date & field capacity
2002	Corn	-0.37	0.46	-0.31
2003	Spring wheat	0.28	0.34	0.45
2005	Spring wheat	0.23	0.33	0.69
2006	Corn	-0.07	0.02	0.10
2007	Spring wheat	-0.19	-0.20	0.36
2008	Soybean	0.28	-0.11	-0.03
2010	Corn	0.38	0.48	0.24

RÉFÉRENCES

Guerif, M., Houlès V., Makowski D. and Lauvernet C., 2006, in: Working with dynamic crops model,. D.Wallach, D. Makowski, and J.W. Jones, Eds Elsevier, 395-402.

Jégo, G., Pattey E., Mesbah, M, Liu, J Duchesne, I. 2015. Int. J. Appl. Earth. Obs. Geoinf. 41, 11-22.

Haboudane, D., Miller J. R., Pattey, E. , Zarco-Tejada, P.J., Strachan, I.B., 2004, Rem. Sens. Environ. 90(3), 337-352.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G., 2002. Rem. Sens. Environ, 83, 195–213.

Liu, J., Pattey, E., Jégo, G. 2012. Rem. Sens. Environ. 123: 347–358

Wallach, D., Buis, S., Lecharpentier, P., Bourges, J., Clastre, P., Launay, M., Bergez, J.E., Guerif, M., Soudais, J., Justes, E., 2011. Environmental Modelling and Software 26, 386-394.

Vrugt, J. a., Braak, C. Ter., Clark, M.P., Hyman, J.M., Robinson, B. a., 2008. Water Resources Research, 44, 1–15.

PARAMÉTRAGE DE LA VERSION DE RECHERCHE « PLANTES PÉRENNES » DU MODÈLE STICS POUR UNE CULTURE ÉNERGÉTIQUE PÉRENNE : LE SWITCHGRASS (*PANICUM VIRGATUM*)

PARAMETRIZATION OF THE STICS SOIL-CROP MODEL FOR SIMULATING A PERENNIAL BIOENERGY CROP: SWITCHGRASS (*PANICUM VIRGATUM*)

Simon Drochon[1], Loïc Strullu[1], Marion Zapater[2], Bruno Mary[1], Fabien Ferchaud[1]

[1]Inra, AgroImpact, Site de Laon, F-02000 Barenton-Bugny, France ; [2]Inra, AgroImpact, Site d'Estrées-Mons, F-80203 Péronne, France

Mots clés : STICS, switchgrass, paramétrage
Keywords : STICS, switchgrass, parametrization

INTRODUCTION

L'utilisation de la biomasse végétale pour produire de l'énergie ou des biomatériaux pourrait permettre de réduire la consommation de ressources fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. Les plantes pérennes dédiées à la production de biomasse, comme le switchgrass (*Panicum virgatum*) ou le miscanthus (*Miscanthus* × *giganteus*), combinent une production importante avec de faibles besoins en intrants. Ainsi, des travaux de recherche sont effectués sur ces cultures pour évaluer leur rendement et leurs impacts environnementaux en fonction du contexte de production. De plus, si ces deux cultures semblent prometteuses, le switchgrass a un faible coût d'implantation contrairement au miscanthus, ce qui pourrait permettre de l'insérer dans des systèmes de cultures pour quelques années et de revenir ensuite à des cultures annuelles. STICS a récemment été adapté pour simuler le fonctionnement des espèces pérennes et paramétré pour le miscanthus. L'objectif de ce travail est donc de paramétrer le switchgrass afin de pouvoir évaluer des scénarios d'insertion de cette culture dans les systèmes agricoles.

MATERIEL ET METHODE

Un jeu de données expérimentales a été regroupé pour servir de base de calibration et de validation. Ces données expérimentales proviennent de deux dispositifs expérimentaux situés à l'INRA d'Estrées-Mons, dans la Somme : le dispositif « Biomasse & Environnement » (B&E) implanté en 2006 et le SOERE ACBB implanté en 2010 ; et de cinq sites expérimentaux répartis entre le nord et le sud de la France (réseau Lignoguide) (Tableau 1). Ces sites permettent de couvrir une large gamme de pédoclimats et de pratiques culturales (coupes précoces en octobre ou tardives en février, fertilisation azotée). De plus, deux variétés sont représentées : Kanlow (appartenant à l'écotype « Lowland », ensemble de variétés plutôt adaptées aux sols humides) et Cave-in-Rock (appartenant à l'écotype « Upland », plutôt adapté aux sols secs et à floraison plus précoce). En 2015, un suivi expérimental dédié a été réalisé sur les deux dispositifs d'Estrées-Mons. Celui-ci a permis d'acquérir des données sur l'évolution du LAI au cours de l'année et sur les biomasses et stocks d'azote dans les parties aériennes et souterraines (rhizomes et racines) de la plante à différentes dates. Pour les autres années, les données disponibles concernent la biomasse et l'azote dans les parties aériennes (une ou plusieurs dates par an) ainsi que les stocks d'eau et d'azote minéral du sol (une à deux mesures par an). Ces données expérimentales ont été séparées en un jeu de calibration et un jeu de validation.
Le travail de paramétrage est réalisé avec la version de recherche « plantes pérennes » du modèle STICS (V8.3.2_perenne_test) qui permet de simuler les flux de carbone et d'azote entre les organes de réserve pérennes et les organes non pérennes (Strullu *et al.*, 2014). A partir des paramètres de plante du miscanthus, un premier ensemble de paramètres a été modifié *a priori* à partir des données expérimentales disponibles et de la bibliographie (température de base, nombre de degrés-

jours nécessaires pour atteindre certains stades, etc...). Les autres paramètres sont optimisés en confrontant les données simulées et observées. Cette calibration est d'abord effectuée à l'échelle annuelle (en 2015) puis à l'échelle pluriannuelle (simulations enchaînées) sur les mêmes traitements expérimentaux. Le modèle est ensuite testé en simulations enchaînées sur l'ensemble du jeu de données de validation. La qualité des simulations est quantifiée par les critères statistiques proposés par Coucheney *et al.* (2015).

Tableau 1 : caractéristique des sites expérimentaux utilisés pour le paramétrage du switchgrass

Site	Localisation	Profondeur de sol (cm)	Variété	Fertilisation (kg N ha^{-1} an^{-1})	Date de récolte	Irrigation	Nombre d'années	Utilisation
B&E	49°87'N 3°01'E	> 200	Kanlow	0	Précoce	Non	10	Calibration
			Kanlow	108	Précoce	Non	10	Validation
			Kanlow	0	Tardive	Non	10	Validation
			Kanlow	108	Tardive	Non	10	Calibration
SOERE ACBB	49°87'N 3°03'E	> 200	Cave-in-Rock	27	Tardive	Non	6	Calibration
Marchais (02)	49°35'N 3°49'E	60	Kanlow	52	Tardive	Non	5	Validation
Catenoy (60)	49°22'N 2°30'E	100	Kanlow	0	Tardive	Non	5	Validation
Le Chesnoy (45)	47°88'N 2°90'E	120	Kanlow Cave-in-Rock	11	Tardive	Année 1	7	Validation
Le Subdray (18)	47°01'N 2°29'E	60	Kanlow	64	Tardive	Année 1	7	Validation
Montans (81)	43°86'N 1°88'E	90	Kanlow	63	Tardive	Non	6	Validation

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle une fois paramétré permettra de tester des scénarios de production de switchgrass.

REMERCIEMENTS

Ce travail est financé dans le cadre du programme GENESYS (IEED PIVERT), par le projet CONSYST. Nous remercions les différents contributeurs de la base de données expérimentale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Coucheney, E., Buis, S., Launay, M., Constantin, J., Mary, B., García de Cortázar-Atauri, I., Ripoche, D., Beaudoin, N., Ruget, F., Andrianarisoa, K. S., Le Bas, C., Justes, E., and Léonard, J. (2015). Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environmental Modelling & Software* 64, 177-190.

Strullu, L., Beaudoin, N., García de Cortázar-Atauri, I., and Mary, B. (2014). Simulation of biomass and nitrogen dynamics in perennial organs and shoots of *Miscanthus* × *giganteus* using the STICS model. *BioEnergy Research* 7, 1253-1269.

MODÉLISATION DES SYSTÈMES DE CULTURES ASSOCIÉES À BASE DE CÉRÉALES EN ZONES TROPICALES

MODELING INTERCROPPING WITH CEREALS IN THE TROPICS AREAS

Alpha Bocar Baldé[1], François Affholder[2], Marc Corbeels[3], Eric Scopel[2]

[1]ISRA, Centre National de Recherches Agronomiques, BP53, Bambey, Senegal ; [2]CIRAD, UR 102 SCA, TA-B-102/02 Avenue d'Agropolis, 34398 Montpellier, France ; [3]CIMMYT,ICRAF House, United Nations Avenue, Gigiri, Nairobi, Kenya

Mots clés : association céréale-légumineuse, modélisation, compétition, rendement, agriculture familiale, STICS-CA, bassin arachidier
Key words : cereal-legumeintercropping, modeling, competition, yield, smallholders, STICS-CA, Senegal Peanut Basin

RÉSUMÉ

Dans la plupart des zones sub-tropicales humides la saison des pluies est trop courte pour permettre une succession de cultures, et l'association de cultures est une option pour diversifier et améliorer la résilience des agrosystemes cultivés. Cependant, les interactions entre plantes associées (facilitation et/ou compétition) sont complexes, variables en fonction du temps, des caractéristiques de chacune des espèces et du mode de gestion de l'ensemble du système. Lacompréhension et la quantificationde ces interactions complexes et leur impact sur la productivité du système nécessite une prise en compte de la dimension temporelle. L'approche expérimentale seule ne permet pas de répondre à ces questions. La modélisation estun outil indispensable –parmi d'autres- et complémentaire des expérimentations, pour appréhender ces situations complexes, incertaines et soumises à plusieurs facteurs, queles simples expérimentations ne peuvent prendre en compte de façon complète.Une base de données assez large est disponible, sur les associations céréales-légumineuses dans les Cerrados au Brésil et dans le bassin arachidier au Sénégal. Elle pourrait s'intégrer à la base IDE-Stics pour faciliter l'évaluation du modèle pour les associations en milieu tropical.
Nous allons présenter un exemple de simulation d'association maïs-plante de couverture avec STICS, calibré puis évalué dans les conditions des Cerrado brésilien. Ensuite, nous discuterons de la façon d'utiliser une approche similaire pour les systèmes associés de mil-niébé et/ou mil-arachide dans le bassin d'arachide sénégalais, pour ainsi améliorer les simulations des associations de cultures en conditions tropicales par le modèleSTICS-CA.

UTILISATION DU MODÈLE STICS POUR ÉVALUER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA VIGNE EN EUROPE

USING STICS CROP SOIL MODEL TO ASSESS CLIMATE CHANGE IMPACTS ON GRAPEVINE IN EUROPE

Helder Fraga[1], Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri[2], João A. Santos[1]

[1] Centre for the Research and Technology of Agro-Environmental and Biological Sciences, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portuga ; [2] Inra, US 1116 Agroclim, F-84914 Avignon, France

Mots clés : Changement climatique, vigne, Europe, impact, spatialisation
Keywords : Climate change, grapevine, Europe, impact, spatialization

INTRODUCTION

La vigne représente environ 3.5 millions d'hectares en Europe, ce qui est 15 fois moins que la surface du blé. Néanmoins son impact économique est très important, car elle représente presque la même valeur économique que le blé (source : Eurostat 2017). Il est donc très important d'anticiper les impacts futurs du climat sur cette culture qui a un impact économique très important afin de définir des stratégies d'adaptation aux conditions futures. Le modèle STICS a été adapté et utilisé pour évaluer l'impact du changement climatique dans plusieurs vignobles de France (Garcia de Cortazar-Atauri, 2006 ; Brisson et Levrault, 2010). Nous présentons une synthèse de deux nouveaux travaux: le premier a permis d'évaluer spatialement l'impact du changement climatique sur la vigne en Europe (Fraga et al., 2016) et le deuxième a pour objectif d'évaluer l'évolution des besoins en irrigation pour cette culture au Portugal afin de maintenir les rendements dans les conditions climatiques futures (Fraga et al., 2017 en révision).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les deux études ont utilisé les variables climatiques nécessaires pour simuler la période passée récente (1980-2005) et le futur proche (2040-2070) (projet EURO-CORDEX) en utilisant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (IPCC, 2013). Pour chaque point de grille (0.125° longitude × 0.125° latitude) les caractéristiques du sol (i.e. texture, profondeur) ont été définies. Pour l'étude à l'échelle européenne, nous avons choisi d'utiliser une seule variété, le Pinot noir, et un seul itinéraire technique standard étant donné la complexité et la quantité de simulations à générer (Fraga et al., 2016). Pour le travail sur l'irrigation au Portugal, nous avons utilisé la variété Tempranillo et nous avons adapté l'itinéraire technique aux conditions de culture de ce pays. Enfin, nous avons testé 5 niveaux de stress (SWFAC = 0.4 – 0.8) pour activer l'irrigation en utilisant la fonction « irrigation automatique » proposé par le modèle. Les simulations de rendement de STICS pour le passé récent et pour l'avenir ont été ensuite comparées et analysées pour prendre en compte les impacts du changement climatique sur la viticulture européenne.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans l'étude à l'échelle européenne, le modèle montre de manière appropriée la distribution des rendements pour les principales régions européennes, affichant des valeurs plus faibles au sud et plus élevés au centre et nord de l'Europe. A l'avenir, le modèle montre une avancée importante de la phénologie (floraison, véraison) et de la date de vendange dans la plupart des régions (figure 1c). On observe aussi une augmentation du rendement dans les régions du Nord et une diminution parfois très importante dans les régions du Sud (Espagne, Italie, Grèce) (figure 1a). Les projections montrent

également une expansion des zones potentielles de croissance de la vigne vers le nord, ce qui entraînera de nouvelles régions aptes à la vinification dans le nord de l'Europe (Figure 1b).

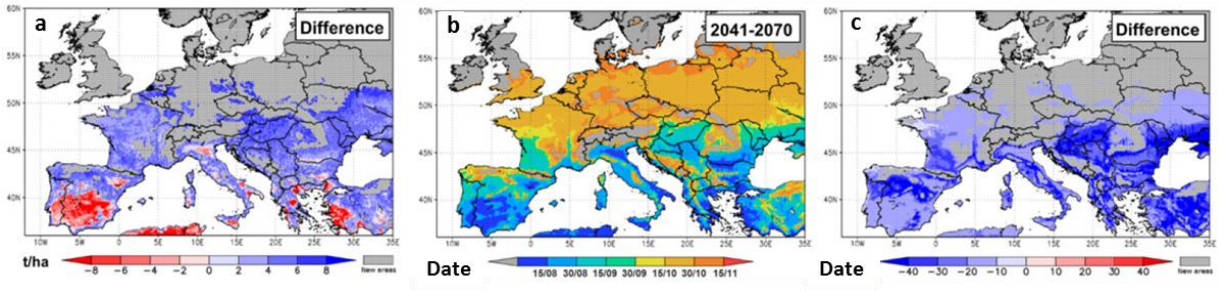


Figure 1 : Simulation de (a) la différence de rendement entre le futur proche (2040-2070) et le passé récent (1980-2005). Simulation (b) des dates de vendange en Europe pour le futur proche (2040-2070) et la tendance (c) par rapport au passé récent (1980-2005).

Dans l'étude pour évaluer l'évolution des besoins d'irrigation de la vigne au Portugal, les projections réalisés avec le modèle montrent que celle-ci est une mesure d'adaptation importante à la durabilité future du vignoble au Portugal. L'étude a montré qu'il est necessaire d'augmenter la quantité d'eau via l'irrigation (Figure 2a) pour maintenir les niveaux de production actuelles. Néanmoins, cela ne suffira pas à observer des pertes de rendement dans le Centre – Sud-Est du pays (Figure 2b). Enfin, cette analyse est complementaire d'autres stratégies d'adaptation au changement climatique à développer dans ces régions.

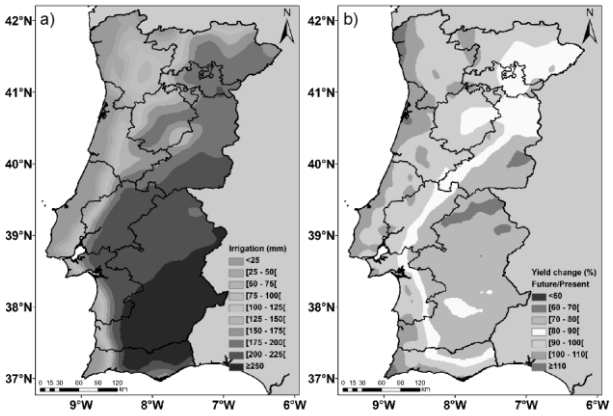


Figure 2 : (a) Quantité d'eau d'irrigation (mm) necessaire à l'avenir (2040-2070) pour maintenir les rendements actuelles. (b) Proportion (%) d'évolution du rendement entre les future (avec irrigation, 2040-2070) et le présent (sans irrigation, 1980-2005).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces études ont permis d'appliquer spatialement en Europe le modèle STICS sur la culture de la vigne pour étudier plusieurs problématiques en lien avec le changement climatique. Les résultats obtenus nous renseignent sur les défis importants que le secteur viti-vinicole devra relever à l'avenir.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET REMERCIEMENTS

Ces études ont été financés par la Portuguese Foundation for Science and Technology (projet UID/AGR/04033/2013); projet "ModelVitiDouro" (PA 53774) financé par les Fond de Developpement Agricole et Rurale ; et le programme PRODER du Gouvernement Portugais.

Brisson, N., Levrault, F., 2010. Le livre vert du projet CLIMATOR (2007–2010). ADEME, Angers 336.

Fraga, H. et al., 2016. Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. Global Change Biol. 22, doi:10.1111/gcb.13382.

Fraga et al., 2017. Viticultural irrigation demands under climate change scenarios in Portugal. (En révision à Agricultural Water Management)

García de Cortazar-Atauri, I., 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse Montpellier-SupAgro.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK; NY, USA, 1535 pp.

MODÉLISATION DES LÉGUMINEUSES À GRAINES AVEC LE MODÈLE SOL-PLANTE *STICS* : CALIBRATION ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ PRÉDICTIVE POUR LE POIS ET LA FÈVEROLE

MODELLING GRAIN LEGUMES WITH THE *STICS* SOIL-CROP MODEL: PARAMETERIZATION AND INDEPENDENT VALIDATION FOR PEA AND FABA BEAN

Gatien N. Falconnier[1], Etienne-Pascal Journet[1,2], Laurent Bedoussac[3], Anthony Vermue[1], Eric Justes[1]

[1] AGIR, Université de Toulouse, INPT, INP-PURPAN, Inra, 31320, Auzeville, France ; [2] LIPM, Université de Toulouse, Inra, CNRS, Castanet-Tolosan, France ; [3] AGIR, Université de Toulouse, INPT, INP-PURPAN, INRA, ENSFEA, 31320, Auzeville, France

Mots clés : féverole, pois, STICS, estimation de paramètres, estimation de la qualité prédictive
Keywords : faba bean, pea, STICS, parameter estimation, independent validation

INTRODUCTION

Current cropping systems in Europe are characterized by high productivity but rely on simplification of crop rotations and high level of chemical/synthetic inputs which has led to soil, water and air pollution and loss of biodiversity (e.g. Stoate et al., 2009). Diversification of cropping systems with grain legumes offer the opportunity to improve agronomic, economic and environmental performance by: (i) decreasing the reliance on synthetic nitrogen fertilizer and thus reduce associated direct and indirect greenhouse gases emissions and risks of nitrate leaching; (ii) increasing cropping system diversity thus lowering pressure of weeds, pests and diseases and thus the use of pesticides.
In order to evaluate their suitability, innovative cropping systems including grain legumes need to be carefully assessed using a diversity of performance indicators: *e.g.* provision of ecosystem services, economic performance, stability in the face of climatic and other abiotic factors variability. Dynamic soil-crop models are useful tools to help this assessment and allow to: (i) estimate indicators that are tedious or expensive to quantify in experimental plots, *e.g.* water drainage, N_2O emissions or N leaching and (ii) explore the robustness of innovative cropping system for a wide range of environmental conditions.
STICS is a generic dynamic soil-crop model that has been widely used to support the design of innovative cropping system. However, there is so far no proper calibration for this model of the main grain legumes grown in Europe, such as Faba bean (*Vicia Faba* L.) and Winter Pea (*Pisum Sativum L.*).
The objective of our work is to both: (i) calibrate and (ii) validate the STICS soil-crop model for faba bean and pea varieties. We particularly analyze the hypothesis that the STICS model is able to simulate accurately N acquisition by both mineral uptake and biological N_2 fixation and then correctly predict growth, grain yield formation, and N content in grains and residues returning into the soil after harvest.

MATERIALS AND METHODS

The experimental data were collected at the INRA experimental site in Auzeville (43°31'N 1°28'E), south of France for twelve growing seasons (2005-2016) for pea and faba bean. Three management factors (cultivar, crop density or incorporation of a cover crop before planting) defined 24 Year-Management units for faba bean and 22 Year-management units for Pea. For each crop, the dataset was divided into a calibration dataset and an evaluation dataset. Dates of development stages, dynamic variables (LAI, above-ground biomass, fixed N and total N accumulated) and end of season variables (grain yield, total above ground biomass, fixed N, N uptake, grain N concentration) were recorded.
A step parameterization procedure was carried out based on Guillaume et al. (2011) results, including ten steps representing the different key processes in the simulation of the final outputs of the model.

For each step, sensitivity analysis (Ruget et al., 2002) and expert knowledge were used to select the parameters having the strongest impact on model outputs. In total, 34 crop parameters were estimated by (1) using bibliography, (2) direct measurements and (3) by mathematical optimisation.
The calibration steps were carried out by using the software package OptimiSTICS (Wallach et al., 2011), and the goodness-of-fit criterion (the average squared error per year-management simulation) was minimised using a simplex algorithm. The estimated parameter values at a given step are the default values of the next steps.
Prediction potential of the model (with the initial and the optimised parameter set) is assessed based on comparison of observed to predicted values with calculations of Root Mean Square Error, Relative Root Mean Square Error and Model Efficiency (EF).

EXPECTED RESULTS

This work is still on-going. The first results are promising and we will soon be able to present the agreement of model simulations with observed data for dynamic variables and end-of season variables for pea and faba bean for both calibration datasets and evaluation datasets.

REFERENCES

Guillaume, S., Bergez, J.-E., Wallach, D., Justes, E., 2011. Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model. European Journal of Agronomy 35, 115–126. doi:10.1016/j.eja.2011.05.003

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. doi:10.1051/agro:2002009

Stoate, C., Báldi, A., Beja, P., Boatman, N.D., Herzon, I., van Doorn, A., de Snoo, G.R., Rakosy, L., Ramwell, C., 2009. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe – A review. Journal of Environmental Management 91, 22–46. doi:10.1016/j.jenvman.2009.07.005

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. doi:10.1016/j.envsoft.2010.09.004

MODÉLISATION DE LA LIXIVIATION, DE LA MINÉRALISATION ET DU BILAN D'AZOTE D'UNE EXPÉRIMENTATION CONDUITE PENDANT 34 ANS EN SOL CRAYEUX

LONG-TERM EXPERIMENTAL AND MODELING ASSESSMENT OF N LEACHING, N MINERALIZATION AND N BALANCE IN 34-YEAR CROP ROTATIONS IN A CHALKY SOIL

Xiaogang Yin[1,2], Nicolas Beaudoin[1], Bruno Mary[1], Fabien Ferchaud[1], Loïc Strullu[2], Florent Chlébowski[1], Jérôme Duval[1], Gaëtan Louarn[2]

[1]Inra UR1158 AgroImpact, 02000 Barenton-Bugny, France ; [2]Inra, UR4 URP3F, F-86600 Lusignan, France

Keywords : Crop rotations, Catch crops, N mineralization, N leaching, STICS

INTRODUCTION

The objectives of the study were to 1) assess the effects of contrasted crop rotations on N leaching, net N mineralization and N balance based on the long-term experimental data from 1979 to 2012, 2) evaluate the catch crop effects on N leaching, N mineralization and N balance, 3) improve and validate the performance of the new STICS version (with updated N mineralization module) in predicting N leaching and N mineralization in a chalky soil on the long-term.

MATERIALS AND METHODS

The current study concerns a long-term experiment (1979-2012) conducted in a chalky soil in the Champagne region (Fagnieres), in a set of 12 undisturbed lysimeters. Four types of crop rotations were compared: rotations without catch crops (lysimeters 1, 8 and 12), rotations with catch crops (lysimeters 3, 9 and 11), permanent grassland until 2003 followed by bare fallow (lysimeter 4), and continuous bare fallow (lysimeter 6). The catch crops effect could be identified since lysimeters 1 and 3, lysimeters 8 and 9 and lysimeters 11 and 12 had the same crop sequences, respectively. The studied period was divided into three periods which had the same crop sequence: Period 1 (1979-1990), Period 2 (1991-2003) and Period 3 (2004-2012). Each lysimeter was equipped with a steel plate at 2 m depth which collected the percolating water.

N leaching was calculated based on measured drainage and nitrate concentration.

Net N mineralization was calculated by the balance mass equation:

$$M = (N_f - N_i) - (F + S + A) + (U + L + G)$$

where N_f and N_i are the final and initial soil mineral N content over the rooting depth (not measured but estimated in the close by Thibie experiment [2]), F is the mineral fertilizer input, S is the symbiotic fixation (estimated using ref [1]), A is the atmospheric deposition; U is the total N uptake by crops, including the N allocated to the root system. L is the amount of leached N and G is gaseous N emissions, which is estimated at 30% of the mineral N fertilizer [3].

The N balance, also called N surplus [2], is the difference between N inputs and outputs, both terms being measured.

Calculations were first made at the annual scale, starting from 1st November of the previous year to 30th October of the next year. They were then integrated at the rotation or the period scales. We consider here calculations made at the rotation scale.

The new STICS version (with updated mineralization module) will be subsequently assessed using the long-term experimental data in simulating both N leaching and N mineralization under contrasted crop rotations in Chalky soil.

RESULTS AND DISCUSSION

N leaching was strongly affected by crop management. It was always greater in the bare fallow soil in all periods and smallest in the permanent grassland. N leaching was lower in the rotations which included catch crops compared to those without catch crops. The effect was even more pronounced during the last period after more than 20 years of continuous catch crops. The nitrate concentration in drained water was lowest in the grassland, but increased sharply after destruction of the grassland. The catch crops significantly reduced the nitrate concentration from about 150 mg L^{-1} to less than 50 mg L^{-1}. However, the differences for both N leaching and nitrate concentration were not statistically significant between crop rotations at the first period.

N mineralization decreased markedly throughout time in the bare fallow soil, from 60 kg N ha^{-1} yr^{-1} to about 20 kg N ha^{-1} yr^{-1}, in parallel with the sharp decrease in total organic N in soil. Catch crops increased net N mineralization throughout time. No significant differences were found between crop rotations for N balance, except that N balance was much lower in the bare soil treatments across all periods. The N balance was about 20 kg N ha^{-1} yr^{-1} in the bare fallow soil, and about 50-60 kg N ha^{-1} yr^{-1} in the crop rotations. The relationship between N leaching and drainage for each lysimeter also confirms that the treatments with catch crop can efficiently decrease N leaching. Moreover, the relationship between N leaching and N mineralization also showed that the treatments with catch crops can increase N mineralization, and reduce N leaching. In addition, the extra N mineralization can significantly increase the extra N uptake due to the catch crops, and further the extra N uptake can significantly reduce the extra N leaching.

CONCLUSIONS

N leaching and nitrate concentration was much higher in bare soil treatments, and catch crops can significantly reduce N leaching and nitrate concentration. On the contrary, catch crops can significantly increase N mineralization and N uptake, which is a good measurement in long term crop rotations in better managing the N regulation. STICS simulation (on going) will allow us to test the ability to predict all components of the N balance.

REFERENCES

Anglade, J., Billen, G., Garnier, J., 2015. Relationships for estimating N2 fixation in legumes: incidence for N balance of legume - based cropping systems in Europe. Ecosphere 6, 1-24.

Constantin, J., Mary, B., Laurent, F., Aubrion, G., Fontaine, A., Kerveillant, P., Beaudoin, N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. Agriculture, Ecosystems & Environment 135, 268-278.

Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., Machet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. European Journal of Soil Science 50, 549-566.

Sebilo, M., Mayer, B., Nicolardot, B., Pinay, G., Mariotti, A., 2013. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. Proceedings of the National Academy of Sciences 110, 18185-18189.

COLLECTE ET ANALYSE DES DONNÉES, POUR LE PARAMÉTRAGE ET LA CALIBRATION DE L'ELEUSINE DANS LE MODÈLE STICS (INDE)

COLLECT AND ANALYSIS OF DATA, FOR PARAMETERIZATION AND CALIBRATION OF THE FINGER MILLET IN THE STICS MODEL (INDIA)

David Astier[1], Nicolas Beaudoin[2], Patrick Bertuzzi[3], Dominique Ripoche[3], Julie Constantin[4], Laurent Ruiz[5], Shivaramu H. S.[6]

[1] ISTOM, Master in agronomy, 95000 Cergy, France ; [2] Inra, UR 1158 AgroImpact, 02000 Barenton-Bugny, France ; [3] Inra, US1116 AgroClim 84914 Avignon, France ; [4]Inra, AGIR 31000 Toulouse, France ; [5] Inra, UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS 29000 Quimper, France ; [6]UAS GKVK, TA, AICRP (Agromet), Bangalore - 560 065, India ;

Mots clés : Inde, Eleusine, analyse de données, calibration, culture pluviale, changement climatique
Keywords : India, Finger Millet, data analysis, calibration, rainfed crop, climate change

INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR ATCHA (2017-2020), qui vise à accompagner l'adaptation de l'agriculture au changement climatique dans le contexte de l'agriculture familiale de l'Inde du Sud. Cette région est le théâtre d'une « crise de l'eau » : depuis les années 1990, les politiques publiques ont encouragé la généralisation de l'irrigation par des pompes immergées ce qui a permis une augmentation de la production agricole mais a conduit à une dégradation de la ressource en eau, voire des sols. Le projet ATCHA repose sur la co-construction de scénarios avec les acteurs du développement agricole de l'Etat du Karnataka et leur évaluation par une modélisation intégrée à l'échelle de bassins versants. Ceci implique d'être capable de modéliser une grande diversité de systèmes de production agricoles représentatifs pour l'Inde du Sud. Or, à part les espèces majeures de la « révolution verte » (riz, blé, maïs...) très peu d'efforts ont été consacrés à la modélisation des cultures tropicales. Un des axes du projet s'attache donc à identifier une gamme de plantes cultivées représentatives de la diversité des systèmes de cultures, à diagnostiquer les facteurs limitants de leur production et à proposer une modélisation de leur fonctionnement et de leurs impacts environnementaux en fonction des conditions pédoclimatiques.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

L'objectif était de réaliser ce travail pour *Eleusine coracana*, une céréale d'importance vivrière majeure en Inde du Sud. La stratégie scientifique a consisté à calibrer le modèle STICS, à partir de la collecte et l'analyse de données expérimentales sur la plante, disponibles sur place mais dont la quantité et la qualité n'était pas optimales. C'est pourquoi, la stratégie de développement a quant à elle consisté à initier un partenariat avec les agronomes et agroclimatologues de l'University of Agricultural Sciences (UAS) de Bangalore, dans l'acquisition des données et leur modélisation. La calibration du modèle s'est donc faite à l'aide de deux sets de données partagés par cette université (l'un pour le paramétrage et l'autre pour la validation), à l'aide du modèle STICS et du logiciel OptimiSTICS (Matlab), selon les étapes classiques : Analyse et sélection des données pour la création des fichiers STICS, Analyse de sensibilité, Optimisation des paramètres et Validation. A noter que cette calibration a été réalisée sur la partie hydrique du modèle mais pas sur la partie azotée (du fait du manque de données sur cette dernière) à partir d'observations de LAI et de rendement en grains et biomasse aérienne. Enfin, après avoir calibré le modèle en travaillant de concert avec les chercheurs indien de l'UAS, des suggestions de dispositifs expérimentaux permettant l'acquisition de données nécessaires au modèle STICS, leur ont été proposés.

RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Le paramétrage de fichiers plante (éleusine mais aussi pois pigeon, arachide, etc...) à partir de données issues de parcelles expérimentales conduites en Inde, est un défi pour le modèle STICS, les conditions étant très différentes et les données n'étant pas toutes disponibles ou adaptées au modèle. Nous avons donc, comme dans toute calibration, été confrontés à la qualité et la quantité des données qui ont limité la qualité de nos résultats : la première optimisation a montré de bon résultats pour le LAI et les rendements en biomasse aérienne mais moyens pour les rendements en grain ; la validation (effectué sur d'autres variétés) n'a pas donné de bons résultats sur le rendement en biomasse et des résultats moyen pour les rendements grains. Cependant, nous avons pu en tirer des conclusions dans le but d'améliorer les prochaines calibrations, le second objectif du projet étant d'insuffler une dynamique de modélisation chez les chercheurs et agronomes indiens, à travers la formation STICS et le travail en partenariat avec l'UAS. Celle-ci devrait pouvoir déboucher sur la mise en place de nouveaux dispositifs expérimentaux pour l'acquisition de données en quantité et qualité nécessaires au paramétrage du modèle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson N., Launay M., Marie B. Beaudoin N. 2008. Stics Conceptual basis Formalisation and Parameterization. Edition Quae. Collection Uptates Sciences et Technologies.

Launay M., Abdessemed A., Gyongyosi R. Avec la collaboration de F. Flenet et N. Brisson. 2008. PROJET NOVANOL AMELIOFI : Modélisation de la culture du lin oléagineux en Picardie. INRA Agroclim.

Rajegowda M. B., Janardhana Gowda N. A., Padmashri H. S., Ravindra Babu B. T. 2014. Weather based agromet advisory for finger millet (ragi) crop in Karnataka (AICRP on Agrometeorology). Bengaluru: University of Agricultural Sciences, GKVK.

MODÉLISATION DE LA PRODUCTION ET DU DEVENIR DE L'AZOTE EN SYSTÈME BIOLOGIQUE À LONG TERME

LONG TERM MODELLING OF CROP PRODUCTION AND NITROGEN FATE IN ORGANIC CROPPING SYSTEMS

Bénédicte Autret[1], Loïc Strullu[1], Nicolas Beaudoin[1], Paul Mäder[2], Jochen Mayer[3], Jorgen Olesen[4], Bruno Mary[1]

[1] Inra, UR 1158 AgroImpact, Site de Laon, F-02000 Barenton-Bugny ; [2] Research Institute of Organic Agriculture, Ackerstrasse, CH-5070 Frick, Switzerland ; [3] Agroscope, Institute for Sustainability Sciences ISS, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zurich, Switzerland ; [4] Danish Institute of Agricultural Sciences, Department of Crop Physiology and Soil Science, Tjele, Denmark

Mots clés : agriculture biologique, balance azotée, azote organique du sol, lixiviation, N_2O, STICS.
Keywords : organic farming, N balance, soil organic N, N leaching, N_2O, STICS.

INTRODUCTION

L'agriculture biologique (AB) est reconnue pour son bilan environnemental favorable en termes de maintien de la biodiversité et de réduction de la pression de pesticides (Tuomisto et al., 2012). Son impact sur l'émission de composés azotés (NO_3, N_2O) ou le stockage de carbone à long terme est plus incertain (Lee et al., 2015). La modélisation déterministe du fonctionnement de ces systèmes est nécessaire pour quantifier cet impact mais aussi un défi méthodologique, compte tenu de la diversité des cultures implantées, seules ou associées, annuelles ou pérennes, et l'utilisation de fertilisants organiques (Huth et al., 2010). Deux dispositifs expérimentaux européens (DOK, Suisse ; Foulum, Danemark) comparent différents systèmes de production en AB, depuis 1978 et 1998 respectivement. De tels dispositifs de longue durée permettent d'évaluer l'effet d'un facteur isolé ou de systèmes complexes en AB et d'explorer la variabilité temporelle de leurs impacts environnementaux.
Les objectifs de cette étude sont de tester la capacité du modèle STICS à simuler la production de différents systèmes de production en AB, le surplus azoté, le stock de matières organiques (MO) du sol et les pertes azotées par lixiviation et émissions gazeuses. Les mesures issues des deux expérimentations de longue durée serviront à la calibration et à la validation du modèle STICS pour les situations de production en AB.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Nous avons d'abord compilé les données issues des deux dispositifs expérimentaux afin de constituer une base de données nécessaire à la modélisation. Les traitements en AB comparés se caractérisent par différents niveaux d'apport de matière organique, de fertilisants azotés ainsi que l'introduction de cultures intermédiaires et pérennes dans les rotations. Les données météorologiques et les mesures effectuées sur les cultures (rendements, biomasse aérienne, azote absorbé) et les sols (humidité, azote minéral, azote et carbone organiques, densité apparente) ont été mesurées régulièrement depuis le début de l'essai. Une version de recherche développée à partir des travaux de Strullu et al. (2015) ainsi que les fichiers plantes calibrés en AB (Chlebowski et al., 2017) ont été utilisés pour simuler la production, le stockage de C et N organiques du sol, le lessivage et les émissions de gaz à effet de serre des deux essais. Les modifications apportées au modèle STICS ont permis la simulation de situations suivantes : destruction de cultures pérennes dans la rotation, minéralisation des MO du sol suivant la destruction d'une prairie dans la rotation, dynamique des restitutions racinaires, enchainement de cultures associées et restitution partielle des fauches de prairie. Le paramétrage du modèle a été réalisé à partir des traitements de références en agriculture conventionnelle (avec

fertilisation minérale, sans cultures intermédiaires ni apports d'effluents d'élevage). La validation du modèle a été faite sur les autres traitements en AB caractérisés par des apports supplémentaires de matière organique et des couvertures végétales permanentes. La qualité prédictive du modèle a été évaluée à partir de différents critères statistiques (différence moyenne, erreur quadratique moyenne, erreur quadratique systématique et non systématique).

RÉSULTATS

Le modèle a reproduit avec satisfaction la production et l'azote exporté dans les traitements en agriculture biologique, mais avec un biais pour l'azote et l'eau du sol. Le surplus azoté (différence entrée –sorties) est bien simulé dans les deux dispositifs, ainsi que l'évolution temporelle des stocks d'azote organique du sol. Le modèle ne prédit aucune différence de lessivage entre traitement sur l'essai DOK, alors qu'une réduction de 60 % du lessivage a été simulée dans le traitement AB de Foulum incluant une culture intermédiaire et exclusion de fertilisation. Les pertes gazeuses simulées (volatilisation et dénitrification) varient surtout avec le niveau de fertilisation, avec des pertes plus élevées pour les traitements conventionnels et AB fertilisés que les traitements sans apport de fertilisant. Enfin, les simulations montrent une entrée importante de C et N dans les couches de sol profond, en dessous de l'horizon labouré, dûe aux restitutions racinaires, notamment dans les traitements incluant des prairies temporaires. Le devenir de ces apports n'est pas simulé par la version courante du modèle, mais pose question.

CONCLUSION

Notre étude a montré que le modèle STICS est capable de reproduire le bilan azoté dans les systèmes de culture conventionnels et AB avec un formalisme commun. Les simulations montrent que les systèmes de culture AB n'induisent pas systématiquement des pertes plus faibles que les systèmes conventionnels, suggérant ainsi une marge de progression pour augmenter l'efficacité azotée des systèmes AB.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les partenaires du FiBL, de l'Agroscope (Suisse) et du DIAAS (Danemark) pour la mise à disposition des données et pour l'expertise apportée sur les deux dispositifs expérimentaux de longue durée. Ce travail a été financé par une bourse de thèse du ministère de l'Agriculture, l'Agence de l'eau Seine Normandie via le projet ENBIO pour la collaboration danoise et l'INRA via le projet européen Climate-CAFE pour la collaboration suisse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chlebowski C., Strullu L., Mary B., Prieur L., Soenen B., Cordoue A.L., Rolland B., Beaudoin N., à venir. Adaptation, parametrization and genericity of the STICS model applied to organic farming.

Huth N.I., Thorburn P.J., Radford B.J., Thornton C.M., 2010. - Impacts of fertilisers and legumes on N2O and CO2 emissions from soils in subtropical agricultural systems: A simulation study. Agriculture, Ecosystems & Environment, 136, 351-357.

Lee K.S., Choe Y.C., Park S.H., 2015. - Measuring the environmental effects of organic farming: A meta-analysis of structural variables in empirical research. Journal of Environmental Management 162:263–274.

Strullu L., Beaudoin N., Thiébau P., Julier B., Mary B., Ruget F., Ripoche D., Louarn G., soumis. Simulation of alfalfa biomass, N accumulation and reserve remobilisation under contrasting management with the STICS model. Journal of Agronomy.

Tuomisto H.L., Hodge I.D., Riordan P., Macdonald D.W., 2012. - Does organic farming reduce environmental impacts? A meta-analysis of European research. Journal of Environmental Management, 112, 309-320.

PARAMÉTRER UNE VARIÉTÉ NOUVELLE DE BLÉ DANS UN CADRE OPÉRATIONNEL ET À PARTIR DE DONNÉES ISSUES DE LA TÉLÉDÉTECTION ET DE CARTES DE RENDEMENT

CROP PARAMETERIZATION IN AN OPERATIONAL CONTEXT BASED ON REMOTE-SENSING AND YIELD-MONITORING DATA

Frédéric Bourdin, Sabine-Karen Yemadje, Martine Guérif, André Chanzy

UMR 1114 EMMAH, Inra-UAPV, 84914 Avignon cedex 9, France

Mots clés : paramétrage variétal, télédétection, agriculture de précision
Keywords : crop genotype parameterization, remote-sensing, precision agriculture

INTRODUCTION

Les développements récents de la télédétection (e.g. Sentinel 2) permettent aujourd'hui, en agriculture de précision, d'appréhender de manière efficace la variabilité spatiale des propriétés du sol et du développement du couvert végétal, offrant de nouvelles perspectives quant à l'amélioration de la gestion du sol et des intrants en agriculture. Notre approche, développée dans le cadre du projet européen FATIMA (fatima-h2020.eu), s'appuie sur la combinaison d'un modèle de culture – le modèle STICS (Brisson et al., 1998)– et de données spatialisées (données satellites, cartes de rendement) pour rendre compte de l'hétérogénéité spatiale observée dans un champ cultivé et adapter la fertilisation azotée en conséquence (Houlès et al., 2005).
Le paramétrage du modèle STICS pour la variété cultivée demeure un élément prépondérant de notre approche car il détermine un grand nombre de fonctions touchant aux différentes étapes du développement de la plante et de la mise en place du rendement, ainsi que les transferts (eau, azote...) dans le système [sol – plante – atmosphère]. Dès lors, l'établissement d'une procédure simple mais robuste de paramétrage variétal du modèle STICS, à partir d'une quantité d'informations réduite, apparaît comme un préalable nécessaire au développement d'un outil opérationnel de calcul d'une préconisation azotée. Nous présentons ici la méthodologie que nous avons développée dans le cas de parcelles de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur des parcelles d'agriculteurs de la région PACA.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Dans le cadre opérationnel évoqué précédemment, seule l'information collectée auprès de l'agriculteur (itinéraires techniques, cartes de rendement, analyses de sol...) ou aisément disponible auprès de sources externes (données satellites, données climatiques, cartes de sol, données techniques sur les variétés de blé utilisées) est utilisée pour le paramétrage de STICS. Dans l'idéal, il est préférable de disposer de plusieurs années de données pour une même variété, de manière à prendre en compte l'effet de la variabilité climatique sur le comportement de la culture et améliorer ainsi la robustesse de la calibration.
La première étape de ce protocole de cette calibration consiste en le choix d'une variété support, par comparaison des dynamiques du LAI et du rendement observées avec les variables lai(n) et mafruit simulées par l'ensemble des 11 variétés répertoriées dans STICS. Notons que nous avons dû ajouter une correction de de la variable lai(n) qui prend en compte la surface des épis, afin de la rendre comparable avec le LAI estimé à partir des réflectances de surface fournies par Sentinel2 qui incorpore toutes les surfaces vertes, et particulièrement la surface des épis après l'étalement de la dernière feuille. Cette fonction correctrice a été paramétrée sur des données observées sur des expérimentations réalisées à Avignon.
Pour la 2ème étape, il s'agit de sélectionner les paramètres à estimer parmi le pool de paramètres variétaux. Il est à noter que pour le blé dur, les travaux antérieurs de calibration avaient identifié un

nombre (17) de paramètres variétaux supérieur au nombre de paramètres habituellement considérés comme variétaux, conduisant ainsi à 11 fichiers plante de type blé dur (Brisson et al., 2005, Guillaume et al., 2011). Certains paramètres, comme ceux relatifs au poids maximal de grains par m^2 (pgrainmaxi et nbgrmax), ont été estimés à partir des corrélations linéaires significatives trouvées entre certaines données variétales des catalogues fournis par l'institut technique Arvalis-Institut du Végétal et ces paramètres. Une analyse de sensibilité permet ensuite de sélectionner, parmi les paramètres candidats, ceux qui seront à estimer par inversion du modèle. Les paramètres choisis interviennent dans le développement de la plante (stlevamf, stamflax, stlevdrp, jvc), dans sa croissance foliaire (adens, durvieF), dans l'absorption azotée (inngrain 1, inngrain 2), ainsi que dans l'élaboration du rendement et de la qualité du grain (vitirazo, vitircarb).

La phase de calibration variétale *stricto sensu* s'effectue par une procédure d'inversion de STICS, sur des observations de LAI, rendement et teneur en azote du grain, pour estimer les paramètres sélectionnés précédemment. On utilise, pour cela, la méthode Simplex du logiciel Optimistics (Buis et al., 2011). Comme pour l'étape 1, une correction de la variable lai(n) doit être effectuée pour prendre en compte dans l'optimisation la surface des épis (le critère minimisé est fondé sur les écarts entre lai(n)+eai(n) et les lai observés par télédétection).

Ce protocole de calibration a été testé sur deux parcelles cultivées en blé dur en 2016 (cv. Pastadou et Isildur) et présentant une hétérogénéité spatiale intéressante pour cet exercice de calibration variétale. La validation de ces résultats est en cours sur un ensemble de parcelles cultivées avec l'une ou l'autre des variétés mentionnées ci-dessus sur les années 2016 ou 2017.

RÉSULTATS

Les premiers résultats de ce travail semblent indiquer une capacité satisfaisante à reproduire la dynamique du LAI et le rendement obtenu à la récolte dans le cas d'une culture bien installée. Par contre, un certain nombre de difficultés persistent quant à la simulation de la teneur en N du grain, par exemple.

CONCLUSIONS

Dans un contexte opérationnel, la limitation de l'information disponible nécessite le développement d'un protocole de calibration variétal simple, utilisable localement mais dont la validité peut être limitée comparée à une calibration établie dans un contexte expérimental. Néanmoins, la possibilité de traiter rapidement un grand nombre de parcelles, dans ce contexte opérationnel, augmente le nombre potentiel d'observations, ce qui peut contrebalancer la faible quantité d'information disponible par parcelle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brisson N., Mary B., Ripoche D., et al, 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18(5–6):311–346.

Houlès V, Guérif M, Mary B, Machet JM, Moulin S, Beaudoin N. 2005. A tool devoted to recommend spatialized nitrogen rates at the field scale, based on a crop model and remote sensing observations assimilation. In: Stafford J (ed). Precision Agriculture '05.

Guillaume S., Bergez JE., Wallach D., Justes E. 2011. Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model. European Journal of Agronomy 35(3): 115-126.

Buis, S, Wallach, D, , Guillaume, S, Varella, H, Lecharpentier, P, Launay, M, Guérif, M, Bergez, JE, and Justes E , 2011. The STICS crop model and associated software for analysis, parameterization and evaluation. In "Methods of introducing system models in field research » , Ahuja L., R., and Ma, L., Editors, ASA-CSSA-SSSA, ISBN 978-0-89118-180-4, 450 pp.

INTÉGRER LES EFFETS DE LA DISPONIBILITÉ EN AZOTE DU SOL DANS UN MODÈLE SIMULANT LES EFFETS DES SYSTÈMES DE CULTURE SUR LA FLORE ADVENTICE : COUPLAGE DES MODÈLES STICS ET FLORSYS

INTEGRATING THE EFFECTS OF SOIL-NITROGEN AVAILABILITY IN A MODEL SIMULATING THE EFFECTS OF CROPPING SYSTEMS ON THE WEED FLORA: COUPLING THE STICS AND FLORSYS MODELS

Delphine Moreau[1], Nicolas Beaudoin[2], Nathalie Colbach[1], Olivia Pointurier[1], Wilfried Queyrel[1], Jean Villerd[1,3]

[1] Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Université de Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France
[2] Agroimpact, INRA, Laon, France
[3] LAE, INRA, Université de Lorraine, Vandoeuvre, France

Mots clés : couplage de modèles, disponibilité en azote du sol, modèle plurispécifique, modèle individu-centré, compétition, mélange d'espèces
Keywords : coupling models, soil-nitrogen availability, multispecies model, individual-based model, competition, species mixture

CONTEXTE

FLORSYS (« FLOR » pour flore adventice, « SYS » pour système de culture) est aujourd'hui le seul modèle mécaniste simulant les effets des systèmes de culture, en interaction le pédoclimat, sur la dynamique pluriannuelle de la flore adventice (Gardarin et al., 2012; Munier-Jolain et al., 2013; Colbach et al., 2014). Cet outil de synthèse des connaissances permet de réaliser des expérimentations virtuelles pour analyser les conséquences de changements de techniques sur la dynamique des adventices, et concevoir des systèmes de culture minimisant le recours aux herbicides (Colbach et al., 2017).
Dans ce modèle 3-D, individu-centré et fonctionnant à pas de temps journalier, chaque plante, qu'elle soit adventice ou cultivée, est spatialement représentée. Bien que simplifiée, cette représentation permet de simuler la compétition pour les ressources qui s'exerce entre plantes. En particulier, le module de microclimat lumineux présent dans FLORSYS permet de simuler la compétition pour la lumière. Depuis peu, un travail est en cours pour simuler également la compétition pour l'azote entre plantes, en prenant en compte les différences de compétitivité entre espèces, selon leurs caractéristiques biologiques. Pour ce faire, trois nouveaux processus écophysiologiques sont en cours d'intégration dans FLORSYS : la demande en azote de la plante, l'architecture racinaire de la plante, et la valorisation de l'azote prélevé au sein de la plante. Il est également nécessaire de simuler la disponibilité en azote du sol à pas de temps journalier sur différentes couches de sol. C'est dans ce cadre qu'un couplage avec le modèle STICS est en cours.

OBJECTIF ET DÉMARCHE

Il s'agit de coupler les modèles STICS et FLORSYS, selon le principe suivant. Au début de chaque jour de simulation, STICS indique à FLORSYS les quantités d'azote minéral disponibles pour les racines dans chaque couche de sol. Sur cette base, FLORSYS simule le prélèvement de l'azote pour chaque plante du couvert. A la fin de chaque jour de simulation, FLORSYS indique à STICS les quantités d'azote minéral restantes dans chaque couche (Figure 1). Le dialogue des deux modèles est organisé par couche de sol, sachant que STICS est monodimensionnel (segmentation verticale uniquement) alors que FLORSYS est bidimensionnel (segmentations verticale et horizontale), et que l'épaisseur des couches est plus fine dans STICS que dans FLORSYS (Figure 1).
Pour réaliser ce couplage, une première étape a consisté à identifier les variables que les deux modèles doivent s'échanger pour fonctionner ensemble. Sur cette base, un travail est en cours pour réaliser la connexion informatique entre les deux modèles. Le code de STICS utilisé pour ce travail est celui issu de l'encapsulation de STICS dans la plateforme Record. Cette démarche permettra de réactualiser le couplage en fonction de l'évolution de STICS.

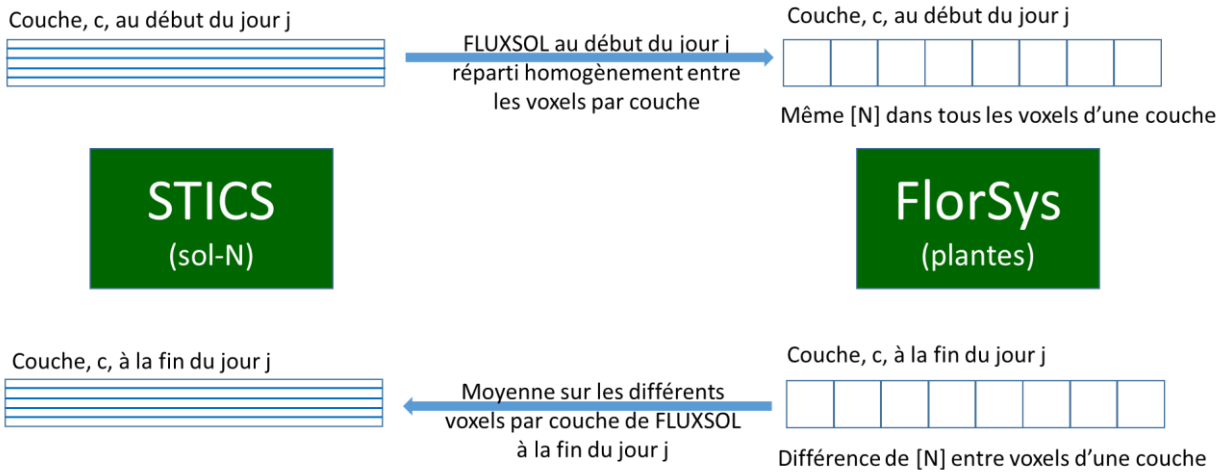


Figure 1 : Schéma des relations entre les deux modèles.

Dans ce couplage, STICS simule pour chaque jour la disponibilité en azote du sol pour la communauté végétale par couche de 1 cm d'épaisseur (variable FLUXSOL), à partir de ses paramètres et variables d'entrée (dont certains sont fournis par FLORSYS). Cette information est fournie quotidiennement à FLORSYS pour renseigner la disponibilité en azote par voxel de sol, la représentation du sol étant différente de celle de STICS (couches plus épaisses et discrétisation horizontale). Sur cette base, FLORSYS simule tous les processus en lien avec le prélèvement de l'azote par les plantes de la communauté. A la fin de chaque journée, FLORSYS calcule la quantité moyenne d'azote restant dans le sol par couche. Cette information est enfin envoyée à STICS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Gardarin A., Dürr C. & Colbach N. (2012) Modeling the dynamics and emergence of a multispecies weed seed bank with species traits. Ecological Modelling 240, 123-138.

Colbach N., Collard A., Guyot SHM., Mézière D. & Munier-Jolain N. (2014b) Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. European Journal of Agronomy 53, 74-89.

Colbach, N., Colas, F., Pointurier, O., Queyrel, W., Villerd, J., 2017. A methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. Eur. J. Agron. 87, 59-73.

Munier-Jolain NM., Guyot SHM. & Colbach N. (2013) A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies: Model structure and evaluation. Ecological Modelling 250, 101-110.

INDEX DES AUTEURS

Affholder François 15,82
Annabi Mohamed 70
Astier David 90
Autret Bénédicte 92
Bahri Haithem 70
Baldé Alpha Bocar 82
Barberis Delphine 50
Basso Bruno 63
Beaudoin Nicolas 27, 32, 39, 55, 88, 90, 92, 96
Bedoussac Laurent 86
Bélanger Gilles 68
Ben Othman Wafa 46
Ben Youssef Salah 70
Bergez Jacques-Eric 74
Bernard Jean-Philippe 77
Bertrand Isabelle 30
Bertrand Nadine 18
Bertrand Romain 52
Bertuzzi Patrick 90
Bodson Bernard 63
Boote Kenneth J. 8
Bourdin Frédéric 94
Budynek-Gallet Anne 30
Buis Samuel 78
Cambouris Athyna N. 66
Carlsson Georg 10
Casellas Eric 24, 74
Chabrier Patrick 74
Chaïb Karim 74
Chakroun Mohamed 70
Chantigny Martin 37
Chanzy André 18, 52, 94
Cheikh M'hamed Hatem 70
Chlébowski Florent 32, 55, 88
Clivot Hugues 43
Clobert Jean 52
Colbach Nathalie 96
Combes Didier 72
Constantin Julie 12, 90
Corbeels Marc 15, 82
Couture Stéphane 74
Crignon Romain 61
de Cordoue Anne-Laure 32
Delaby Luc 24
Delagarde Rémy 24
Denoroy Pascal 30
Desfonds Véronique 18
de Wit Jan 10
Drochon Simon 80
Durand Jean-Louis 72
Duru Michel 24
Duval Jérôme 88
Escobar-Gutiérrez Abraham 72
Falconnier Gatien N. 86
Faverdin Philippe 24
Faverjon Lucas 72
Favrelière Elise 55
Ferchaud Fabien 27, 80, 88
Fraga Helder 83
Gérard Frédérique 30
Garcia de Cortazar-Atauri Iñaki 83
Garrigues Sébastien 18
Gaudio Noémie 46
Godard Caroline 61
Godinot Olivier 21
Gomez-Macpherson Helena 10
Graux Anne-Isabelle 24
Guérif Martine 94
Gustavsson Anne-Maj 68
Hanegraaf Marjoleine 10
Hansen Emilie 10
Hinsinger Philippe 30
Höglind Mats 68
Houot Sabine 41
Jayet Pierre-Alain 50
Jégo Guillaume 37, 59, 66, 68, 78
Jouany Claire 30
Journet Etienne-Pascal 86
Julier Bernadette 39
Justes Eric 10, 12, 43, 61, 86
Kavic Marko 30
Korhonen Panu 68
Launay Marie 46
Le Bas Christine 24
Lecharpentier Patrice 46, 78
Lengrand Amélie 55
Léonard Joël 37
Levavasseur Florent 41
Liu Jiangui 78
Lizarazo Clara 10
Loreau Michel 52
Louarn Gaëtan 27, 35, 39, 72, 88
Lungarska Anna 50
Macena da Silva Fernando Antônio 15

Mäder Paul 92
Mary Bruno 27, 32, 43, 55, 80, 88, 92
Mayer Jochen 92
Meillet Anne 24
Mesbah Morteza 59, 66, 78
Migault Vincent 72
Mollier Alain 30
Moreau Delphine 96
Morel Christian 30
Morissette René 66
Moulin Sophie 18
Naudin Krishna 15
Nyiraneza Judith 66
Olesen Jorgen 92
Olioso Albert 18
Palosuo Taru 68
Pattey Elizabeth 37, 59, 78
Pellerin Sylvain 30
Pernel Jérôme 61
Persson Tomas 68
Peyraud Jean-Louis 24
Pointurier Olivia 96
Poméon Thomas 24
Porter John Roy 7
Prieur Loïc 32
Queyrel Wilfried 96
Rakotovololona Lucia 55
Raynal Hélène 24, 52, 74
Reckling Moritz 10
Resmond Rémi 24
Ringeval Bruno 30
Ripoche Dominique 24, 46, 90
Robaldo Guillaume 52
Rolland Bernard 32
Ronceux Aïcha 55
Ruget Françoise 18, 24
Ruiz Laurent 90
Saint Jean Sébastien 46
Salva Hélène 74
Santos João A. 83
Saudreau Marc 46
Schnebelin Eléonore 21
Scopel Eric 15, 82
Shivaramu H. S. 90
Sinaj Sokrat 30
Soenen Baptiste 32
Souissi Amir 70
Strullu Loïc 27, 39, 80, 88, 92
Thérond Olivier 24
Topp Kairsty 10
Tribouillois Hélène 12
Van Oijen Marcel 68
Vermue Anthony 10, 86
Vertès Françoise 24
Villerd Jean 96
Virkajärvi Perttu 68
Willaume Magali 10
Yemadje Sabine-Karen 94
Yin Xiaogang 88
Zaka Serge 35
Zapater Marion 80
Zebarth Bernie J. 66

RÉGION
Nouvelle-
Aquitaine

LA ROCHELLE

INRA
SCIENCE & IMPACT