

Calibration et test de STICS en système de grande culture biologique

Florent Chlébowski^{1*}, Loïc Strullu^{1&2}, Bénédicte Autret¹, Lucia Rakotovololona¹, Amélie Lengrand¹, Bruno Mary¹, Josette Garnier³, Loïc Prieur⁴, Baptiste Soenen⁵, Anne-Laure de Cordoue⁵, Bernard Rolland⁶, Nicolas Beaudoin^{1*}

¹ INRA, UR 1158 AgroImpact, 02000 Barenton-Bugny, France ;

² INRA, UR P3F, 86600 Lusignan, France ;

³ Sorbonne Universités, UPMC, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 75005 Paris, France ;

⁴ CREAB Midi-Pyrénées, 32020 Auch Cedex, France ;

⁵ ARVALIS - Institut du Végétal, France ;

⁶ INRA, UMR 1349 IGEPP-MVI, 35653 Le Rheu, France.

*florent.chlebowski@inra.fr ; nicolas.beaudoin@inra.fr

Résumé

L'agriculture biologique (AB) est présentée comme susceptible de relever le défi alimentaire et de durabilité. Son cahier des charges, proscrivant les intrants de synthèse (phytosanitaires et engrais), lui donne une crédibilité auprès des consommateurs. Dans les systèmes de culture AB, la lutte contre les bio-agresseurs s'appuie sur les leviers systémique (succession culturale) et curatif (lutte mécanique et manuelle) ; la fourniture des nutriments s'appuie sur l'introduction de cultures légumineuses et/ou d'engrais organiques. Ces traits en font des systèmes complexes et variables. La connaissance de leur production et de leur impact environnemental lié aux cycles C-N, soulève des questions de recherche, sur les régulations biotiques et les déterminants des cycles biogéochimiques. La modélisation déterministe des cycles eau-C-N de ces systèmes pose des questions scientifiques et techniques.

La modélisation déterministe des systèmes de culture AB s'est basée sur l'hypothèse (H) que les formalismes conçus en agriculture conventionnelle (CONV) sont transposables en AB, sous réserve que les bio-agresseurs sont maîtrisés. Le modèle STICS a été choisi pour sa finalité agro-environnementale, ses propriétés de généralité, de robustesse, d'évolutivité et d'accessibilité de son code. Une version de recherche explicitant mieux la dynamique des flux de carbone et d'azote du système racinaire et la gestion des prairies temporaires a été choisie. Les résultats portent sur sa calibration indépendante, conduite dans le cadre du PIREN-Seine, et son test, dans le cadre des projets ENBIOexpé et ABAC.

La calibration indépendante a concerné des espèces ou variétés botaniques et a demandé de vérifier la capacité du modèle à rendre compte des effluents organiques utilisés en AB. La calibration s'est faite en respectant la généralité du modèle indépendamment du système de culture étudié (AB ou CONV). La calibration d'espèces s'est appuyée sur la recherche bibliographique et l'optimisation mathématique. Cette dernière a demandé de collecter des bases de données indépendantes et d'en qualifier les jeux de données vis-à-vis de la pression des bio-agresseurs (métadonnées du modèle). Le paramétrage de nouvelles espèces et variétés a concerné le blé d'hiver, le triticale, l'orge de printemps, l'escourgeon et la féverole d'hiver. Les résultats de calibration permettent de valider le réalisme de l'hypothèse H.

Les bases de données de test proviennent i) du réseau de parcelles AB des Hauts-de-France suivi dans le cadre du projet ENBIOexpé, ii) du réseau de parcelles AB et CONV du projet ABAC, iii) des « essais systèmes » de long terme de Foulum (Danemark) et DOK (Suisse). Elles permettent d'y tester respectivement les prédictions de : i) la production et de la mobilisation d'azote des céréales et l'arrière effet azote d'une luzerne à l'échelle bisannuelle ; ii) la lixiviation d'azote à moyen terme ; iii) la production et de la mobilisation d'azote des cultures à long terme. L'ensemble démontre la robustesse du modèle. Il est ensuite utilisé pour aborder des questions scientifiques sur le fonctionnement de ces agrosystèmes (Beaudoin et al., 2017 ; rapport PIREN-Seine).

1. Problématique et démarche générique

1.1. Contexte agro-environnemental

L'agriculture biologique (AB) est en croissance constante tant en termes de surface que de marché, et notamment en France. En effet, ce système de culture, qui supprime toutes utilisations d'intrants chimiques, représentait en 2012, 3,7 % de la surface agricole utile française avec une croissance sur 5 ans de 85 % (« Les chiffres en images | Alim'agri » 2016). Cela démontre un réel changement dans les pratiques agricoles en réponse à une attente d'une partie au moins des consommateurs. Cette croissance révèle aussi un besoin de connaissances sur ce type d'agriculture de plus en plus important.

Selon la FAO, l'agriculture biologique constitue une voie privilégiée pour relever le défi alimentaire mondial et celui de la durabilité de l'agriculture. Son bilan environnemental est *a priori* favorable, par le renforcement de la résilience des systèmes et la proscription des produits chimiques de synthèse. Cette conclusion s'applique au risque de pollution par les phytosanitaires et au maintien de la biodiversité, mais pas forcément aux impacts relatifs aux cycles de l'eau, du carbone et de l'azote qui sont discutés.

Pour lever cette incertitude, il faut pouvoir quantifier les pertes de nitrate, du stockage de carbone dans le sol et des émissions de gaz à effet de serre. Ces données sont aujourd'hui insuffisantes pour pouvoir anticiper les impacts d'une possible généralisation de l'AB à l'échelle de grands bassins (Thieu et al., 2010). Les indicateurs multicritères sont quant à eux précieux pour juger la durabilité globale ou l'évolution de systèmes (Fontaine et al., 2012 ; Guichard et al., 2010). Néanmoins, une modélisation quantitative permettrait d'intégrer les flux à l'échelle de temps et d'espace (Moreau et al., 2012 ; Billen et al., 2009).

1.2. Contexte scientifique

Les systèmes de culture AB sans élevage sont des objets de recherche à privilégier pour l'importance de leurs régulations biologiques et le bouclage de leurs cycles biogéochimiques. L'enjeu est de comprendre le rôle des déterminants des bilans eau, azote (N) et carbone (C) de systèmes de grande culture à bas intrants. La modélisation est un outil précieux pour : i) tester des hypothèses sur le fonctionnement complexe de tels systèmes ; ii) prédire l'impact de scénarii. Cependant, les exemples d'application d'une modélisation déterministe du système sol-culture-atmosphère en AB sont très rares (Doltra et al., 2011 ; Leifeld et al., 2009).

L'application d'un modèle déterministe dans ces systèmes agricoles représente un défi scientifique, du fait de la complexité associée à plusieurs de leurs traits : i) l'importance des régulations biologiques ; ii) la grande complexité des rotations culturales ; iii) l'importance accrue du flux d'azote d'origine atmosphérique associés à la fixation symbiotique (BNF) ; iv) l'importance des apports d'origine organique. Il s'y ajoute un défi d'ingénierie pour calibrer le comportement des nombreuses variétés ou d'espèces ignorées de l'agriculture conventionnelle (CONV) et la minéralisation des nombreux amendements organiques utilisés en AB.

Le modèle STICS présente des atouts pour relever ce défi (Brisson et al., 2009). Sa généralité et sa robustesse lui permettent d'être appliqué à l'échelle d'un bassin hydrologique (Beaudoin et al., 2016 ; Ledoux et al., 2007). Sa performance a été évaluée pour un panel de situations pédo-climato-culturelles en France, variant par la disponibilité du rayonnement, de l'eau ou de l'azote (Coucheny et al., 2015). Il peut prendre en compte des successions de cultures ou des cultures associées mais pas l'effet des bio-agresseurs que sont les adventices, maladies et ravageurs. Enfin, son évolutivité, permise par une gouvernance explicitée et la gestion de la traçabilité du code permet le travail sur des versions dite de recherche, gérées de façon autonome et articulées avec la version diffusée, dite standard.

La calibration indépendante de STICS en système de grande culture biologique s'inscrit dans le cadre du PIREN-Seine qui cofinance ce projet. Il répond aux besoins de modélisation de deux thèses conduites dans le cadre du projet ENBIOexpé qui vise à quantifier et modéliser les bilans eau, C et N de systèmes AB de grande culture et du projet ABAC qui permet de comparer les surplus et la lixiviation d'azote de systèmes AB et CONV, ainsi que les bilans C, N, P (Cf. Rapport PIREN-Seine, Garnier et al., 2017). Le volet calibration et test de STICS est traité en amont dans ce document d'une façon autonome. Les résultats d'application du modèle sont présentés dans le rapport PIREN-Seine Beaudoin et al. (2017) : « Quantification et modélisation de la production et des bilans C et N en systèmes de culture biologiques (AB) ».

1.3. Défis de la calibration de STICS en AB et objectifs

La démarche vise à intégrer les spécificités de l'AB impactant les cycles biogéochimiques à l'échelle annuelle ou de la succession : pression biotique, diversification des cultures, rôle de la BNF et des effluents organiques. Un postulat dans ce rapport est que, si le turn-over de l'azote se différencierait entre AB et CONV, il ne serait perceptible qu'à long terme. La réponse à cette question scientifique est abordée dans Beaudoin et al. (2017, rapport PIREN-Seine) d'après Autret (2017). L'hypothèse fondatrice (H1) est ici que STICS peut être appliqué en AB sans changer les paramètres globaux calibrés en CONV si la nutrition phosphopotassique et les bio-agresseurs y sont « suffisamment » maîtrisés ; sachant que le modèle STICS n'intègre pas ces effets.

La pression en adventices et en maladies des systèmes AB est généralement plus forte que dans les systèmes conventionnels, ce qui en explique en partie les moindres rendements. Ces stress, dit biotiques, n'étant pas pris en compte par le modèle STICS, ouvrent un enjeu scientifique majeur mais aussi une question cruciale dans ce travail de paramétrage et de calibration du modèle.

Les effets biotiques et le défaut de connaissance de la minéralisation des effluents pourraient influencer sur la performance des simulations, telle que :

- Compétition des adventices :
 - Pour la lumière, qui joue sur la croissance en biomasse sèche de la plante et sur le rendement. D'où une tendance à leur surestimation par le modèle par rapport aux observations.
 - Pour l'eau et l'azote, il pourrait y avoir une tendance à surestimer la quantité prélevée par la culture seule. Cependant, la prédiction pour la culture seule pourrait être proche de l'observation pour l'ensemble culture et adventices (hypothèse H2). La validation de cette hypothèse aurait en corollaire que les stocks d'eau et d'azote du sol soient bien prédits, et donc que les fonctions de stress de la culture le soient aussi.
- Impact des maladies et des ravageurs :
 - Ils provoquent une perte de biomasse et surtout de rendement, ce qui va donc dans le sens de leur surestimation par le modèle.

Les apports en fertilisant minéraux étant exclus en AB, la nutrition azotée se base principalement sur le recours aux légumineuses et sur l'épandage de fertilisants organiques (vinasses, fumiers et composts, farines de viande, plumes déshydratées...). Or, la plante prélève l'azote dans le sol sous sa forme minérale (NH_4^+ et NO_3^-). Les fertilisants organiques restitués sous forme de résidus de culture des légumineuses ou apportés comme produits exogènes, sont rendus bio-disponibles par la communauté bactérienne du sol. Le modèle STICS a bien été paramétré pour simuler la fixation symbiotique et simuler la minéralisation des résidus de culture ou d'apports d'amendements exogènes sous formes organiques (Justes et al., 2009 ; Nicolardot et al., 2001), qu'ils soient laissés à la surface du sol ou enfouis. Cependant, il existe deux limites, du fait de sa genèse en système conventionnel : le manque de références sur la performance de prédiction de la BNF ou sur les paramètres de minéralisation de divers types d'amendements. Ce qui peut influencer les simulations de la façon suivante :

- Devant l'importance de l'azote minéral issu de la fixation symbiotique, il est fait l'hypothèse que les prédictions sont non biaisées mais incertaines (hypothèse H3) :
 - Incertitude sur la quantité totale fixée ;
 - Incertitude sur la dynamique de minéralisation des résidus à moyen terme.
- Impact de la méconnaissance de la minéralisation des engrais sous formes organiques :
 - La part de l'azote minéral étant de l'ordre du pourcent dans ces engrais, la majeure partie de l'azote est sous forme organique et est donc minéralisée au cours du temps. Ceci nécessite donc de s'assurer de rendre compte des vitesses spécifiques de minéralisation pour qu'il n'y ait pas un phénomène d'anticipation de la biodisponibilité de l'azote minéral entre simulations et expérimentations.

Les objectifs sont ici d'étendre la diversité des cultures et des amendements pris en compte par STICS en s'affranchissant au maximum des limites précédemment décrites :

- Calibrer les paramètres variétaux et si nécessaire spécifiques des cultures étudiées dans les projets de recherche du PIREN-Seine, soit en priorité, le blé d'hiver, l'orge de printemps, l'escourgeon, le triticale, la féverole d'hiver.
- Calibrer la dynamique de minéralisation de l'azote d'effluents organiques apportés.
- Tester la prédiction de l'azote disponible issu de la minéralisation des résidus de légumineuses.

2. Matériel et méthodes

2.1. Formalismes modèle de simulation sol-plante-atmosphère STICS

Le modèle STICS simule, d'une façon dynamique, l'effet des pratiques culturales, du climat et du sol sur le développement, la croissance et la production des plantes et leur impact sur l'environnement (Brisson et al., 1998). Il peut être appliqué à une plante récoltée une fois ou plusieurs fois, des cultures associées ou plusieurs cycles de culture successifs. Sa version standard est décrite en détail par Brisson et al. (2009) et a été évaluée récemment sur un vaste ensemble de données couvrant 15 cultures et une large gamme de conditions agropédoclimatiques en France (Coucheney et al., 2015). Le développement de la plante repose sur un indice vernalo-photo-thermique, tandis que la croissance des plantes s'explique par l'accumulation de carbone (de Wit, 1978). Les radiations photosynthétiquement actives (PAR) sont interceptées par les feuilles selon la loi de Beer et transformées en biomasse en utilisant l'efficacité d'utilisation des rayonnements (équation de Monteith). La biomasse végétale est répartie entre la biomasse structurelle et métabolique des organes aériens (tiges, feuilles vertes et feuilles mortes) (Brisson et al., 2009). La teneur en N de la plante dépend de l'accumulation de biomasse dans la plante, de la disponibilité d'azote minéral dans le sol, du développement du système racinaire et, pour les légumineuses, de la fixation symbiotique.

Afin de fonctionner, le modèle a besoin de différentes entrées. Celles-ci sont notamment les données climatiques journalières telles que la température, la pluviométrie, le rayonnement... Il nécessite également des informations sur l'itinéraire technique afin de définir la date de semis et de récolte, les dates de travail du sol ou encore les dates des apports d'intrants organique ou de synthèse. Il faut par ailleurs définir le système sol dans lequel la simulation se déroule. Pour cela, l'état initial de ce dernier doit être renseigné mais aussi ces caractéristiques physico-chimiques (Figure 1). Toutes ces données d'entrées permettent de définir une unité de simulation (USM) donnant au modèle toutes les informations nécessaires à son fonctionnement.

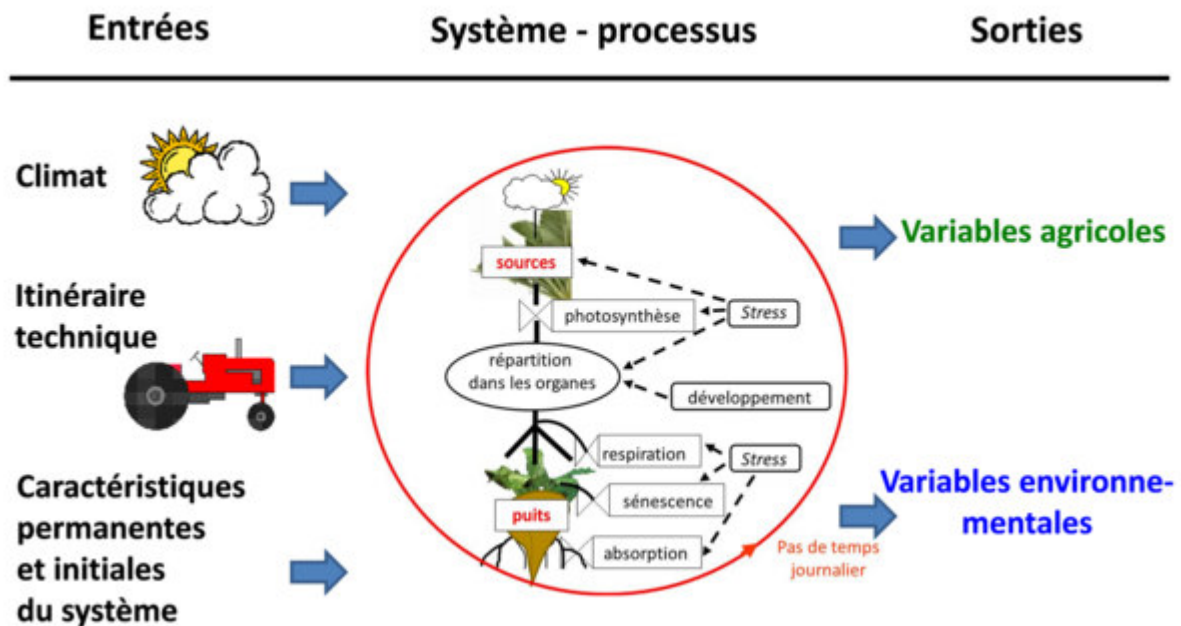


Figure 1. Principe de fonctionnement de STICS (« STICS - Les principes de fonctionnement »)

2.2. Principe et méthode de calibration

2.2.1. Définitions

La performance de prédiction d'un modèle, appliqué dans son domaine de validité, repose sur le réalisme de ses formalismes, la qualité de son paramétrage et la fiabilité de son code. Un bon paramétrage est une condition nécessaire rédhibitoire. Ce concept mérite d'être précisé.

En général, le concept de paramètre est fluctuant entre modèles. Il en ressort que leur accessibilité l'est aussi. Dans STICS, presque tous les paramètres sont accessibles et donc très peu sont directement « en dur » dans le code. Les paramètres de STICS se classent en deux catégories principales :

- Les paramètres globaux considérés comme stables pour toutes les simulations. Ils sont en général fixés par le modélisateur. Ils peuvent concerner toutes les composantes du système sol-culture-atmosphère-techniques. Ils sont contenus dans les fichiers de paramètres généraux et de paramètres par espèce botanique. Le fichier de paramètres généraux contient aussi des typologies de caractéristiques des engrais, des cailloux et des résidus et amendement organiques, où chaque type a ses propres paramètres. Le fichier par espèce végétale contient aussi une typologie de variétés où chacune a ses propres paramètres.
- Les paramètres locaux, qui concernent le sol, le climat et les techniques du cas d'étude, sont quant à eux sous la responsabilité de l'utilisateur.

Le mot calibration s'adresse ici à des paramètres globaux de l'espèce ou variété et du type d'amendement.

2.2.2. Principe de base et version de STICS utilisée

La mobilisation de l'hypothèse H1 présente un triple intérêt :

- Pouvoir bénéficier des calibrations et des conceptions effectuées antérieurement en situation CONV ;
- Permettre un aller et retour des tests effectués en situation AB et CONV ;
- Permettre de simuler les deux types de situation avec un même formalisme.

En s'appuyant sur cette même hypothèse, deux versions du modèle sont utilisables :

- La version standard de STICS, dite « courante », qui est la version actuellement disponible pour tous les utilisateurs pour faire les simulations sous STICS. Elle présente l'avantage d'être calibrée pour de nombreuses espèces (Coucheney et al., 2015). Cependant, elle ne décrit pas la dynamique d'accumulation du carbone et de l'azote dans les racines, mais seulement les quantités recyclées vers le sol en fin de culture.
- La version de recherche de STICS, dite « à réserves », qui sera la version standard à moyen terme (v. 10), actuellement en cours de développement, dont l'intérêt majeur est de permettre une compartimentation complète de l'azote entre parties aériennes et souterraines de la plante de façon dynamique (Strullu et al., 2014 ; 2015). Le travail de calibration a donc intégré cette compartimentation de l'azote dans l'ensemble des parties de la plante tout au long des simulations. Par ailleurs, cette version de recherche a été complétée pour intégrer des spécificités des systèmes de culture alternatifs plus complexes, pour : i) réaliser des simulations successives incluant des cultures associées ; ii) effectuer des simulations successives de cultures pérennes (miscanthus, switchgrass) ou pluri-annuelles (prairies, luzerne) au cours de simulations successives avec transmission des caractéristiques du système racinaire (biomasse, N, turn-over) ; iii) semer une culture dans une culture déjà établie tout en rendant possible son développement dans une simulation successive ; iv) exporter ou laisser au sol les fauches de cultures pluri-annuelles ; v) considérer les retours de C et N au sol dus à la destruction des cultures pluri-annuelles ou pérennes.

La version de recherche (v. 10) a donc ici été utilisée car elle explicite la répartition et la compétition pour l'azote entre organes, compétition d'autant plus cruciale pour des systèmes où l'azote est souvent limitant. Ainsi, pour modéliser au mieux le stress azoté, il faut que le système racinaire lui-même soit au plus proche des conditions expérimentales. Dans cette optique, une option du modèle permet de lier la dynamique d'expansion de la densité de longueur racinaire à la production de matière sèche aérienne, conformément aux travaux de Baret et al. (1992). Dans ce cadre, un paramétrage du profil racinaire (ex : blé) ou une adaptation (ex : féverole) des fichiers « plante » a été réalisé. Cela pour que ce travail soit généralisable autant en AB qu'en CONV.

L'hypothèse H1 conduit à donner priorité à la calibration de paramètre variétaux. Cependant, l'activation de l'option « lien trophique », et d'une façon générale, la confrontation de la modélisation aux réalités de l'AB a nécessité de modifier certains paramètres génériques de l'espèce. Dans ce cas, la capacité prédictive du modèle avec le nouveau panel de paramètres génériques appliqué aux situations CONV a été vérifiée, de façon à valider l'hypothèse H1 (test de non régression).

Dans la suite de ce rapport, la version de STICS utilisée, sera la version de recherche, qui permet une amélioration cruciale des simulations du modèle notamment pour des situations culturales en AB.

2.2.3. Méthode de calibration

La méthode de calibration employée est la suivante :

- Réalisation d'une étude bibliographique sur la phénologie et l'écophysiologie et sur les modèles existants pour chaque espèce. Conclusion sur le choix d'une espèce apparentée déjà calibrée dans STICS.
- Constitution et qualification d'une base de données par espèce en suivant le cahier des charges de la base de données de validation-test de STICS, et en se donnant des critères de classement en fonction de l'état phytosanitaire des parcelles.
- Calibration et test de chaque module spécifique suivant la méthode formalisée pour STICS. Les étapes sont : 1) paramétrage selon la bibliographie quand cela est possible ; 2) optimisation sur des jeux de données à l'aide d'outils informatiques sous Java ou Matlab ; 3) test sur un jeu de données indépendant.

2.2.4. Collecte et qualification des jeux de données

Dans les systèmes en AB, compte tenu de la faiblesse des moyens expérimentaux disponibles de ce secteur, les situations culturales permettant d'accéder au rendement potentiel génétique sont quasi inexistantes. Cette limite est une contrainte majeure dans la méthode de paramétrage et de calibration du modèle. Les facteurs biotiques peuvent affecter la croissance des plantes de plusieurs façons comme les adventices qui sont des compétiteurs pour l'eau, la lumière et l'azote, réduisant alors la croissance et le rendement de la culture, qui seront alors surestimés par le modèle par rapport aux observations. Les maladies peuvent affecter le feuillage et donc la biomasse en cours de végétation par une moindre interception de la lumière ou directement la biomasse des fruits. Cela conduit aussi à une surestimation systématique de la biomasse et du rendement.

La démarche de modélisation en AB sera de fait de caractériser en amont les jeux de données disponibles en termes de pression des bio-agresseurs. Cette information est alors utilisée dans trois règles :

- Les situations où un stress biotique est signalé sont éliminées des bases de données de calibration du modèle ;
- Les situations identifiées comme non affectées d'un stress biotique sont utilisées en calibration ;
- Sous condition que les adventices puissent être répertoriées en tant que cultures associés, technique culturale que le modèle sait simuler (Corre-Hellou et al., 2009), les situations avec adventices pourront faire partie des données de validation si elles sont suffisamment bien identifiées. Elles serviront dans ce cas à tester l'hypothèse H2.

Par ailleurs, les jeux de données sont qualifiés en terme de disponibilité des variables d'entrées du modèle (valeurs initiales, données sol-techniques-climat) et des données observées, en termes de cinétique en cours de cycle ou de valeurs finales, avec saisies de métadonnées (projet IDE-STICS).

2.2.5. Evaluation des performances

Pour chaque jeu de paramètre du modèle, les performances du modèle sont évaluées à l'aide d'une routine de calcul fonctionnant sous le logiciel R (package *SticsEvalR*). Le logiciel produit pour chacune des variables d'intérêt, deux types de visualisation sur la confrontation entre valeurs simulées et observées :

- Cinétique d'évolution journalière par situation ;
- Graphique de type XY, avec Y = variable simulée et X = valeur observée, regroupant toutes les situations confondues.

Chacune des représentations graphiques est accompagnée de paramètres statistiques pour évaluer le modèle. Ces différents paramètres sont : la RMSE (Root Mean Square Error), E ou MD (Mean Difference) et EFF (model EFFiciency). Leur calcul est défini ci-après (Equations 1) :

Equations 1. Equations des paramètres liés à l'évaluation du modèle

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Sim}(i) - \text{Obs}(i))^2}$$
$$\mathbf{MD} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Obs}(i) - \sum_{i=1}^n \text{Sim}(i)}{n}$$

$$\mathbf{EFF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Sim}(i) - \text{Obs}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}(i) - \overline{\text{Obs}})^2}$$

Avec : **Obs(i)** = Valeur observée, **Sim(i)** = Valeur simulée et **Obs** = Valeurs moyennes observées

3. Calibration de l'espèce « blé d'hiver » et contrôle de la minéralisation des apports exogènes

En appliquant la démarche explicitée en introduction de ce rapport, sur l'extension du domaine d'utilisation de STICS en AB, et en utilisant en sus la version de recherche (v. 10), l'exemple du blé d'hiver sera ici pris comme application directe à cette méthode comme démonstration ; sachant que d'autres espèces ont fait l'objet d'une calibration indépendante : le triticale, l'escourgeon, l'orge de printemps et la féverole d'hiver, qui font l'objet d'une notice technique.

Habituellement, l'extension en AB du domaine de validité de STICS part d'une étude écophysiological pour identifier un fichier plante proche. Elle n'est pas utile ici car le fichier plante du blé d'hiver a déjà fait l'objet d'une calibration robuste dans la version courante de STICS (v. 8.4.1.). Par contre, les paramètres de description du système racinaire liés à la version de recherche font l'objet d'une recherche bibliographique.

3.1. Paramétrage variétal

L'une des particularités de l'AB en céréaliculture, est l'utilisation de variétés adaptées. Il a donc fallu paramétrer de nouvelles variétés pour prendre en compte cette spécificité de ces systèmes. C'est donc à l'aide de 4 essais, conduits en AB dans différentes régions de la France, pour lesquels des suivis phénologiques ont été faits, que le paramétrage de ces stades a pu être réalisé. Ces sites sont les suivants :

- La ferme expérimentale du CREAB Midi-Pyrénées à Auch dans le Gers ;
- Les sites expérimentaux de Boigneville et de La Motte, en région parisienne, conduit par ARVALIS ;
- Les essais de sélection variétale de blé destiné à l'agriculture biologique de l'INRA de Rennes.

Grâce à ces divers essais et résultats, il a été possible d'aboutir à 7 nouvelles variétés spécifiques de ces systèmes agricoles. Ces différentes variétés sont : Renan, Paledor, Arpege, Astaro, Orpic, Saturnus et Pireneo.

Dans la démarche d'application de STICS à l'AB, une fois le paramétrage variétal assuré, il faut se pencher sur la question cruciale de la dynamique de l'azote dans les différents organes de la plante.

3.2. Allocation dynamique de l'azote vers les racines

Cette option, spécifique à la version de recherche de STICS, permet une allocation dynamique non pas uniquement vers les parties aériennes mais également en parallèle vers le système racinaire avec une priorité pour ce dernier. Cette option est d'ailleurs cruciale en système biologique. En effet, ces systèmes sont, pour rappel, généralement en carence azoté par rapport aux besoins de la plante. La compétition à l'azote entre organes est donc plus prononcée.

Il faut par conséquent, s'assurer du réalisme de la simulation du système racinaire.

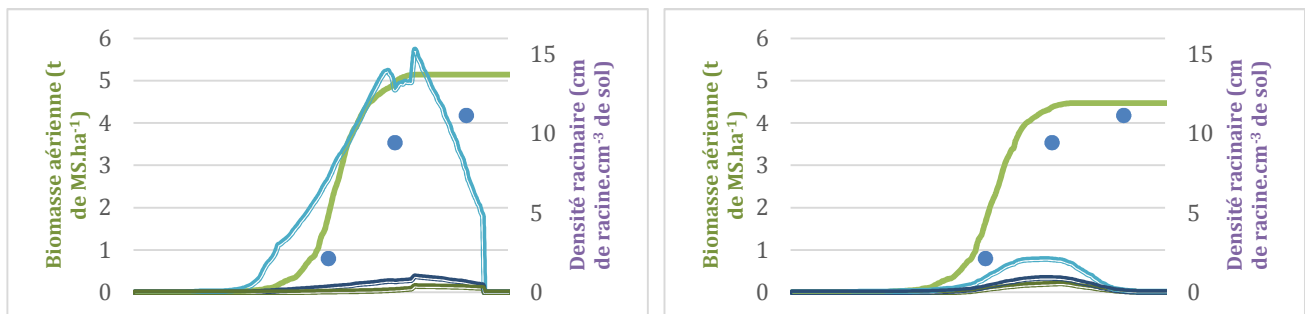
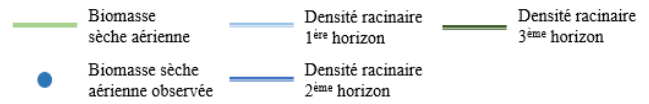


Figure 2. Evolution simulée de la densité racinaire ($cm^3 cm^{-3}$ de sol) et de la matière sèche aérienne ($t MS ha^{-1}$) d'un blé d'hiver avec la version courante de STICS (à gauche) et avec la version de recherche (à droite) - Fichiers « plante » distincts



La figure 2 montre que par le passé, l'évaluation de la simulation de ce dernier avait pu être insuffisante. L'activation de l'option « lien trophique », complétée de l'optimisation de trois paramètres relatifs à la croissance racinaire du blé et sa relation avec la biomasse aérienne, a permis d'améliorer le réalisme du profil de densité racinaire (Figure 2). La simulation du profil racinaire paraît plus réaliste à titre d'expert (Fan et al., 2016 ; Zuo et al., 2004), tant en dynamique qu'en densité, et donc d'éviter une compétition trop forte à l'azote du système racinaire.

3.3. Résultats des simulations du blé d'hiver en agriculture biologique

L'activation de l'allocation dynamique de l'azote et le paramétrage du profil racinaire ayant quelque peu modifié les simulations, il a fallu, à la marge, réajuster quelques paramètres. Cela démontre donc la qualité de la démarche appliquée, et de la généricité du modèle, puisque celle-ci a permis d'obtenir de très bon résultats en système AB sans changement radical dans le paramétrage espèce ayant été fait auparavant ; ces paramètres étant essentiellement liés aux fonctions de stress à l'azote sur le développement de la plante et à l'allocation de l'azote vers les grains.

Les résultats des simulations sur la base de données de calibrations sont présentés à la figure 3, en reprenant les équations présentées précédemment (Equations 1). Les données ont bien entendu été sélectionnées de telles manières que seules celles sans pressions biotiques soient gardées dans ce jeu de calibration.

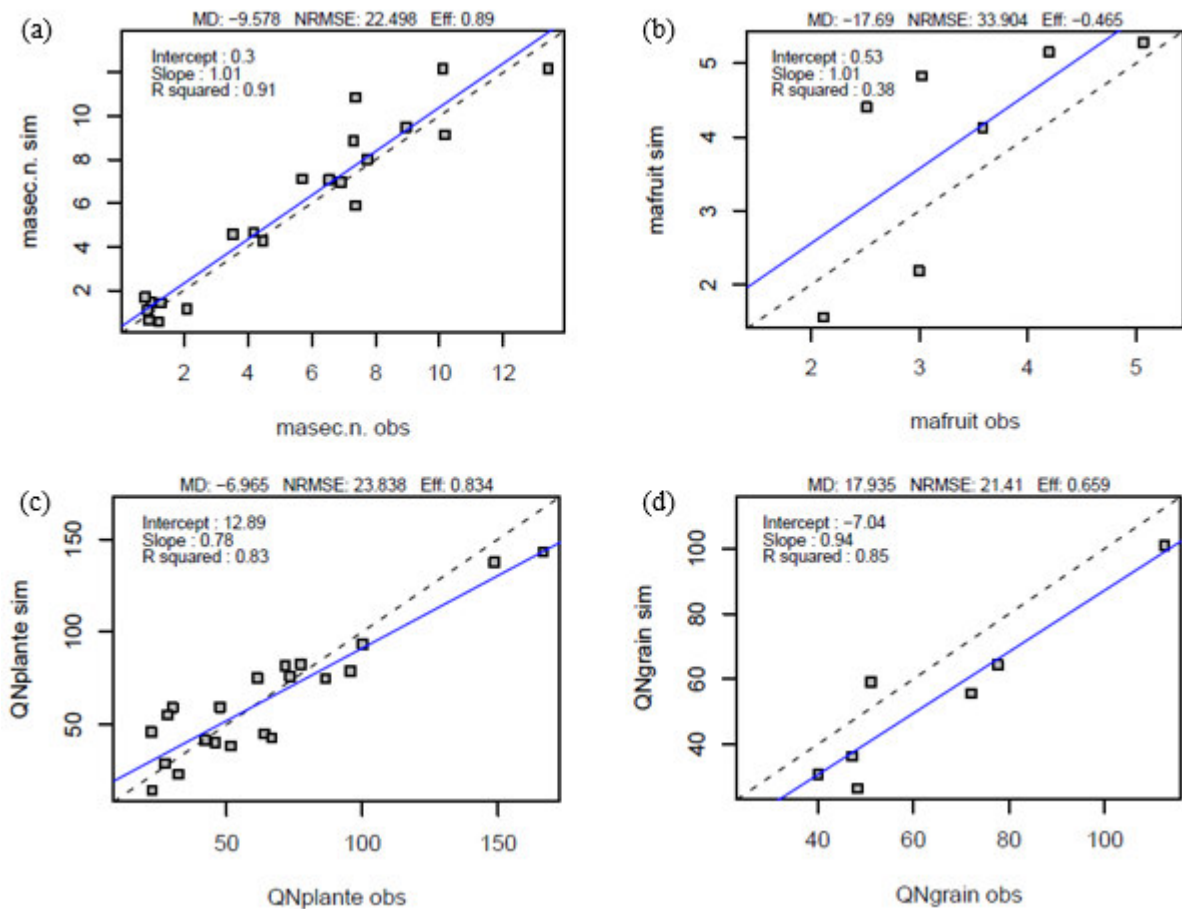


Figure 3. Comparaisons entre observations et simulations de (a) la matière sèche aérienne ($t MS ha^{-1}$) et du (b) rendement en grain ($t MS ha^{-1}$), de (c) la quantité d'azote dans les parties aériennes et (d) dans le grain ($kg N ha^{-1}$)

Ces résultats de calibration du blé d'hiver montrent la possibilité de faire des simulations en systèmes biologiques AB à la condition de bien rendre compte des compétitions entre organes et en prenant soin de sélectionner correctement les jeux de données. Comme le montre la figure 3, ces résultats indiquent une tendance à la bonne estimation par le modèle des valeurs observées sur le terrain. Cela, que ce soit pour la matière sèche aérienne et sa teneur en azote, mais aussi pour le rendement en grain, même si pour cette dernière, les résultats semblent un peu moins bons du fait du nombre moins important de données et de deux valeurs surestimées.

Malgré cela, il reste encore des marges de progrès, qui pourraient impliquer les formalismes. En s'intéressant à la simulation de l'azote dans le grain, cette variable semble en moyenne sous-estimée. Cela est dû à une différence entre pratique agricole et possibilité actuelle du paramétrage du fichier plante. En effet, du fait de la moindre disponibilité en azote dans les systèmes AB, les agriculteurs se tournent généralement vers des variétés dites améliorantes. Cela signifie que ces dernières sont capables d'allouer plus efficacement l'azote vers le grain, et permet donc de conserver une bonne qualité protéique du grain. Or, ce formalisme est géré, non pas au niveau variétal, mais au niveau espèce dans STICS. Ceci explique donc la tendance à la sous-estimation de cette variable.

3.4. Minéralisation d'apports organiques exogènes

Pour rappel, l'une des particularités des systèmes conduits en AB est de recourir massivement aux engrais verts endogènes issus de légumineuses ou aux apports exogènes de produits résiduaux organiques (PRO) ; encore appelés matière fertilisante d'origine résiduaire (MAFOR). Il faut donc vérifier que le modèle restitue bien la dynamique de la minéralisation de l'azote dans le sol provenant de ces divers résidus. L'objectif est alors de s'assurer de la capacité du modèle à rendre compte de cette minéralisation de l'azote dans le sol.

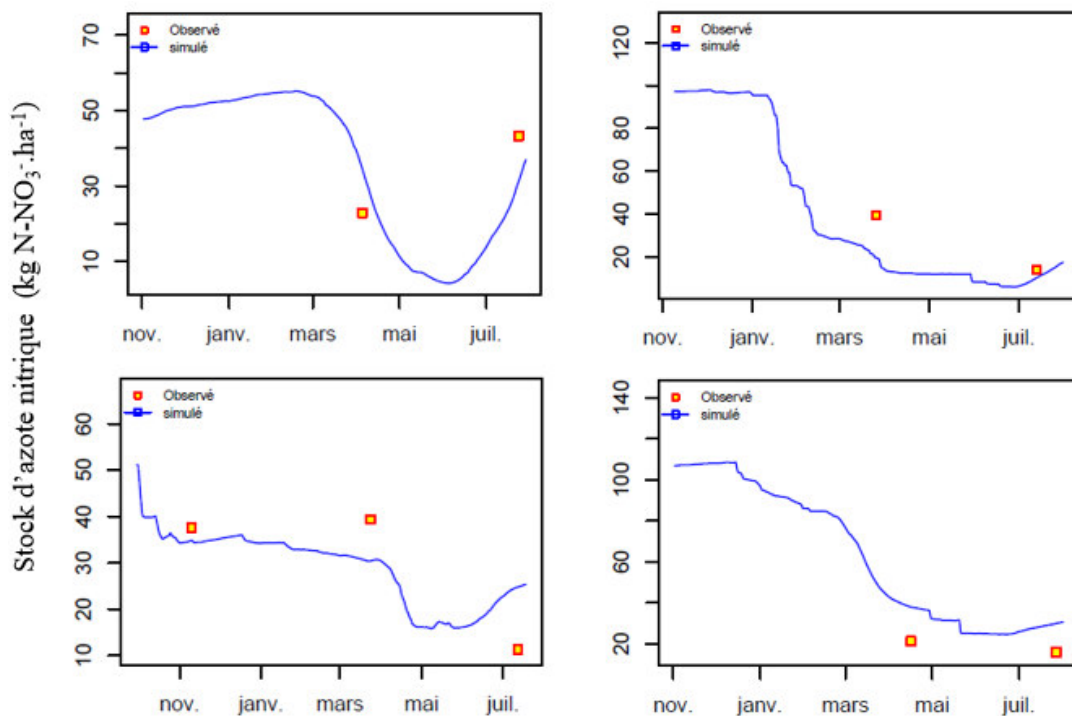


Figure 2. Comparaisons dynamiques entre observations et simulations de l'évolution des stocks en azote nitrique du sol ($\text{kg N-NO}_3^- \text{ha}^{-1}$) sur 4 essais de blé d'hiver en AB ayant reçu des PRO en amendements

Les résultats obtenus de la minéralisation de ces PRO (ex : vinasse, fiente de volaille...) sont présentés en figure 2. Dans le cas où ces PRO ne sont pas encore paramétrés, ils ont été assimilés à d'autres déjà paramétrés et présentant une vitesse de minéralisation proche. La dynamique du stock d'azote nitrique est globalement très bien rendue, cela, en confrontant les résultats des simulations aux observations de ces stocks. Ceci démontre de l'aptitude du modèle à rendre compte de la minéralisation de ces apports.

Le modèle STICS, de par son formalisme, permet ainsi de traiter de ces itinéraires techniques généralement employés en AB et démontre son adaptabilité à de nombreuses situations rencontrées dans ces systèmes.

Des travaux sont cependant encore engagés sur la question. En effet, de par la grande diversité des PRO et de leur dynamique de minéralisation spécifique à chacun, tous ne sont pas encore paramétrés dans STICS : tels

que les fientes de volailles ou encore les plumes déshydratées. En outre, avec la version de recherche, et en collaboration avec les équipes de l'INRA de Grignon, un travail est en cours pour mieux rendre compte de l'effet du stockage du carbone et de l'azote sur des essais à long terme à la suite de l'application de divers PRO.

3.5. Test de non régression du modèle

Les résultats obtenus en AB valident en partie l'hypothèse H1. Le test complémentaire demande à être conduit en situation « contrôlée ». Il faut s'assurer qu'il n'y a pas eu, lors de la calibration, de compensation d'erreur et que le modèle reste fiable pour des situations en CONV avec les changements opérés *a minima* dans le fichier plante du blé d'hiver.

Pour cela, l'utilisation de la base de données propres à STICS permet cette vérification. Cette base est appelée base SMS et elle contient nombre d'USM qui permettent de contrôler la non régression du modèle au fur et à mesure des travaux sur le modèle. L'activation de l'option concernant l'allocation dynamique de l'azote dans l'ensemble de la plante appellera une nouvelle calibration à terme.

Ainsi, les résultats présentés aux figures 5 et 6 sont issus des simulations sur l'ensemble de cette base SMS concernant le blé d'hiver.

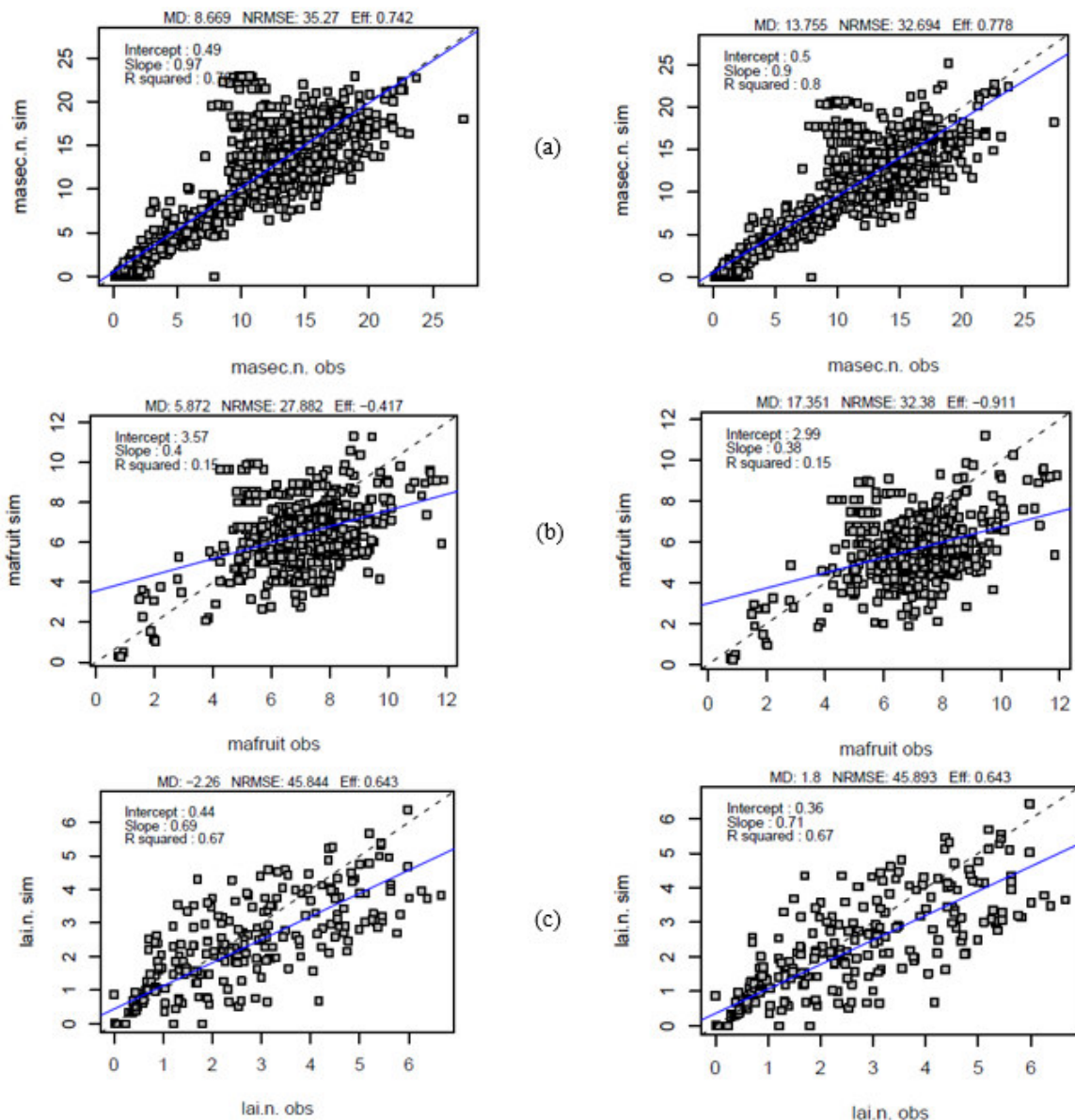


Figure 5. Comparaisons entre la version courante (gauche) et de recherche (droite) de STICS pour la (a) matière sèche aérienne ($t MS ha^{-1}$), le (b) rendement en grain ($t MS ha^{-1}$) et (c) l'indice foliaire sur les données de la base SMS blé d'hiver

Cette comparaison entre les deux versions de fichiers « plante » propre à chaque version, montre que la démarche d'application de STICS en AB, explicitée en introduction donne des résultats cohérent avec les simulations sur la version courante. Des résultats qui sont quelques fois meilleurs (biomasse aérienne et, notamment, l'indice de nutrition azoté), quelques fois un peu moins performant (rendement) et parfois identique (indice foliaire). La calibration faite sur des données en AB est directement applicable avec le même formalisme à des situations CONV.

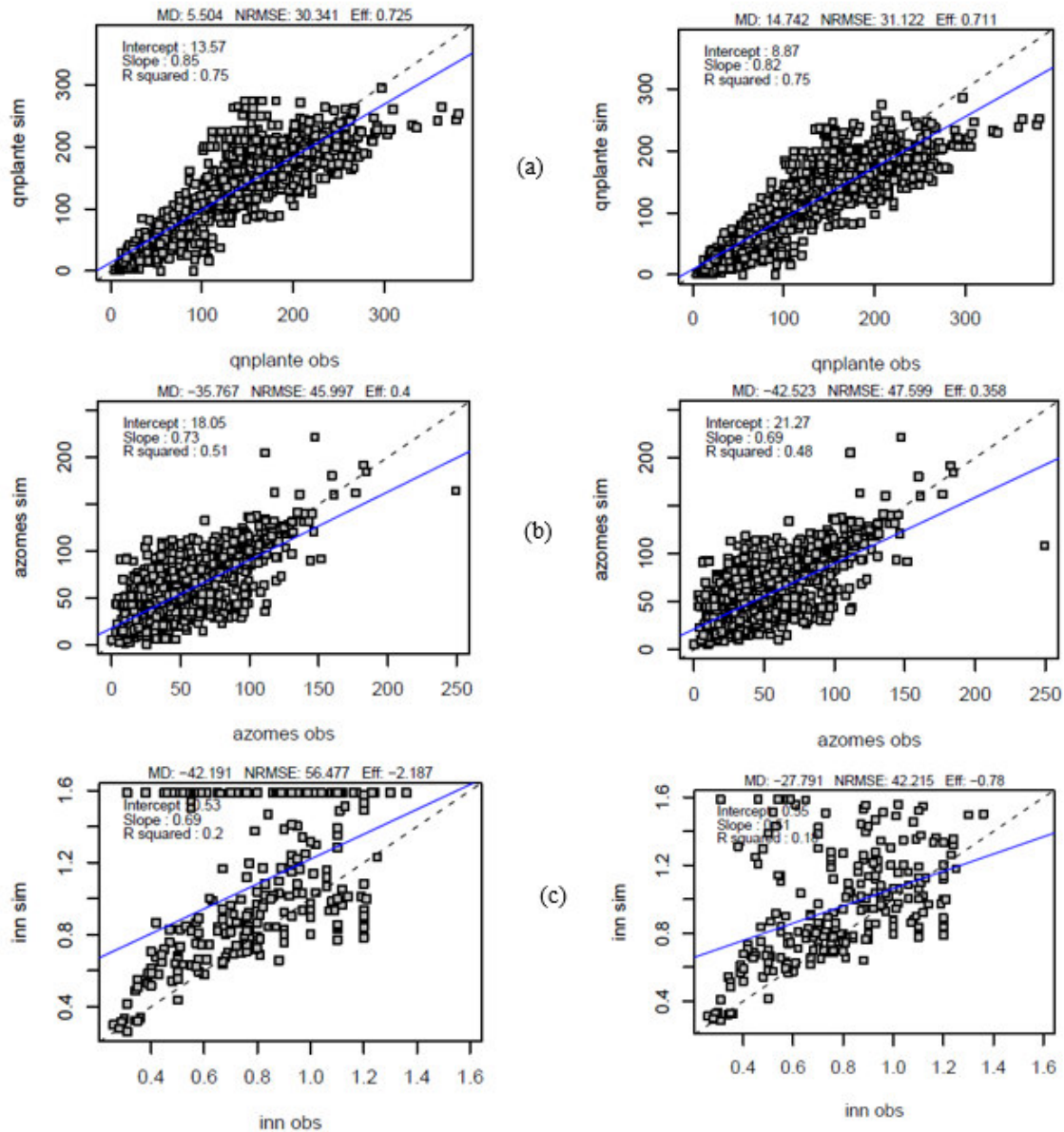


Figure 6. Comparaisons entre la version courante (gauche) et de recherche (droite) de STICS pour la (a) quantité d'azote dans les parties aériennes de la plante (kg N ha^{-1}), la (b) quantité d'azote nitrique dans le sol ($\text{kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) et (c) l'indice de stress azoté sur les données de la base SMS blé d'hiver

Cette version de STICS peut donc être appliquée indifféremment en systèmes AB où les bio-agresseurs sont suffisamment contrôlés ou en systèmes CONV, ce qui valide l'hypothèse H1. Cela est un résultat fort, car il démontre la généricité des formalismes du modèle, ce qui permet de mutualiser les efforts de recherche et de calibration entre systèmes AB et CONV. Cependant, cette conclusion nécessite deux compléments :

- La future adoption de la version de recherche comme version standard appliquée indifféremment en AB ou CONV nécessitera de revisiter l'ensemble du paramétrage de l'espèce blé, en ré-optimisant certains

des paramètres de calage des fonctions autres que le système racinaire. Cette future calibration globale s'appuiera sur des données issues de l'agriculture biologique et conventionnelle.

- L'application de STICS en AB nécessite une expertise conjointe sur la pression des bio-agresseurs, en particulier dans les situations réelles dites « on farm », comme le montrent les exemples suivants.

4. Test du modèle en situation AB « on farm »

4.1. Matériel et méthodes

4.1.1. Le réseau des parcelles AB des Hauts-de-France

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la thèse de Lucia Rakotovololona (2018). Le réseau est composé de 35 parcelles appartenant à 9 exploitations agricoles suivies sur trois années culturales (Beaudoin et al., 2017 ; rapport PIREN-Seine). Sur chaque parcelle élémentaire, les mesures sont répétées sur deux blocs, afin de caractériser la variabilité des stocks et flux en eau et en azote (des sols et des plantes). Des données relatives aux adventices et maladies ont été également acquises afin de connaître les conditions d'utilisation du modèle.

Les parcelles concernées par ce test sont celles cultivées en blé d'hiver ou triticale, hormis les céréales associées aux légumineuses. Elles représentent 9 parcelles pour la campagne 2014-2015, 12 parcelles pour la campagne 2015-2016 et 8 pour la campagne 2016-2017. Les cas d'étude se situent dans le même contexte géographique et géologique de terrains sédimentaires du Nord Bassin Parisien. Ils se différencient très peu par leurs sols mais beaucoup par le climat de l'année (Tableau 1), ce qui en rend la comparaison intéressante.

Tableau 1. Caractéristiques climatiques des parcelles étudiées sur le réseau des 35 parcelles du 1^{er} octobre au 31 juillet

	Tmin °C	Tmax °C	P mm	ETP mm	P - ETP mm	RG daJ.cm ⁻²
2015	6,8 (± 0,5)	13.1 (± 0,5)	522 (± 48)	563 (± 31)	- 41 (± 46)	100 (± 5)
2016	7,5 (± 0,5)	13 (± 0,4)	741 (± 49)	459 (± 24)	283 (± 71)	80 (± 4)
2017	6,4 (± 0,7)	13 (± 0,3)	436 (± 65)	542 (± 39)	- 89 (± 99)	92 (± 6)

Tmin = température minimale moyenne (°C) ; Tmax = température maximale moyenne (°C) ; P = somme des précipitations (mm) ; ETP = Evapotranspiration Potentielle (mm) ; RG = rayonnement global moyen (daJ cm⁻²) ;
Entre parenthèses les écarts-types

La variabilité spatiale du climat est faible mais sa variabilité temporelle est forte. Les campagnes se différencient principalement au niveau de leur bilan hydrique climatique (P-ETP) positif en 2016 et négatif en moyenne en 2015 et 2017. L'année 2016 a été une année très humide alors qu'en 2017 on a relevé les précipitations les plus basses pour la région depuis 15 ans. L'année 2015 quant à elle se situe dans la moyenne.

4.1.2. Le réseau ABAC

Le réseau ABAC a pour objectif d'étudier l'impact de la lixiviation des nitrates dans les eaux sous-racinaires, dans un contexte où peu de références existent entre les systèmes AB et CONV. Il intègre des exploitations des deux systèmes, sur le Bassin de la Seine, pour comparer les concentrations en azote nitrique dans le sol entre ces deux systèmes (Benoit et al., 2016). Ces exploitations ont été équipées avec des bougies poreuses, placées à 90 cm de profondeur, afin de suivre sur plusieurs années (ici 3 ans) l'évolution de la concentration sous-racinaires en nitrate.

L'enjeu d'appliquer STICS sur ces données est double : i) tester la performance du modèle ; ii) prédire la concentration pour une profondeur de sol supérieure à celle des bougies, sachant que les racines colonisent probablement une plus grande épaisseur que 90 cm. En première approche, le choix a été fait de s'intéresser uniquement à une des exploitations en AB. Cela afin de déterminer les capacités du modèle STICS à simuler le devenir des nitrates par lixiviations. Cette exploitation est par ailleurs suivie *via* 9 parcelles présentant des rotations distinctes :

- Moutarde + Vesce en interculture | Féverole de printemps | Blé d'hiver + Trèfle blanc | Triticale
- Blé d'hiver + Trèfle blanc | Blé d'hiver + Trèfle blanc | Blé de printemps + Trèfle blanc
- Triticale + Trèfle violet | Trèfle violet | Blé d'hiver
- Blé d'hiver | Triticale | Avoine en interculture / Trèfle violet
- Avoine | Moutarde + Vesce en interculture | Féverole d'hiver | Blé d'hiver

Des apports de PRO (compost, fiente de volaille et/ou vinasse) sont notamment faits avant une céréale si le précédent n'est pas une légumineuse.

4.2. Test de la prédiction multicritère annuelle en situation AB « on farm »

4.2.1. Performance du modèle pour la simulation des stocks d'eau et d'azote minéral

Le modèle est appliqué ici en situations avec une pression de bio-agresseurs variables : cela permettra de réaliser une analyse du défaut de rendement (Beaudoin et al., 2017 ; rapport PIREN-Seine). Le test concerne successivement les variables stocks en eau et en azote minéral du sol, production de matière sèche et quantité d'azote de la culture. Les stocks d'eau et d'azote minéral étant bien simulés (Figures 7 et 8), la prédiction du stress hydrique et azotés ne sera donc pas à remettre en cause.

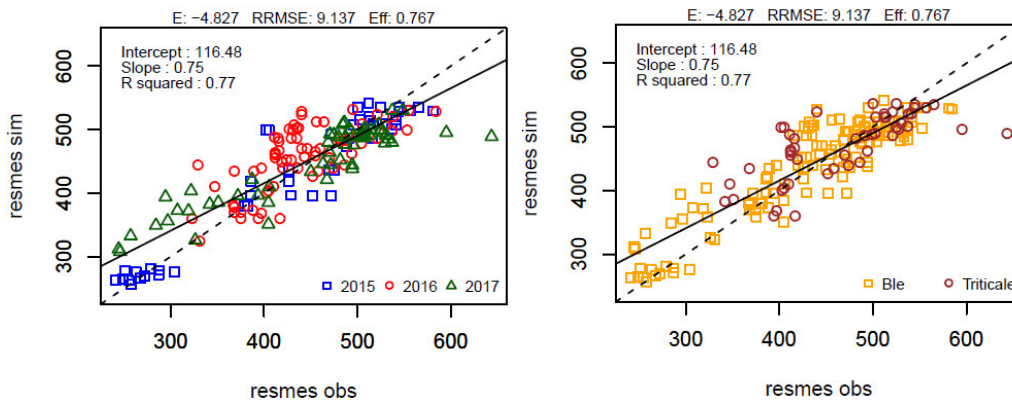


Figure 7. Test de prédiction des stocks d'eau (mm) simulés par rapport aux observations. A gauche détail des trois campagnes et à droite détails des deux cultures, blé et triticale.

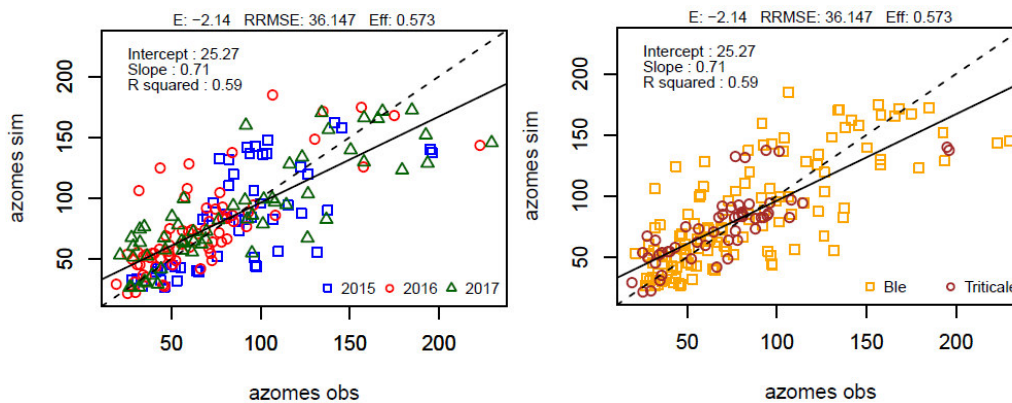


Figure 1. Test de prédiction des stocks d'azote minéral (kg ha^{-1}) par rapport aux observations. A gauche détail des trois campagnes et à droite détails des deux cultures, blé et triticale.

4.2.2. Performance du modèle pour la simulation de la production et l'absorption d'azote

Il existe une tendance à la surestimation de la biomasse aérienne (Figure 9) et de la quantité d'azote (Figure 10) dans la culture. Cela est cohérent avec l'hypothèse que des cultures conduites en AB sont soumises à des stress biotiques, qui ne peuvent pas être pris en compte par STICS.

Il est par conséquent intéressant de voir si la quantité d'azote dans la plante, prédite par le modèle, est proche de la quantité d'azote dans la culture principale et les adventices.

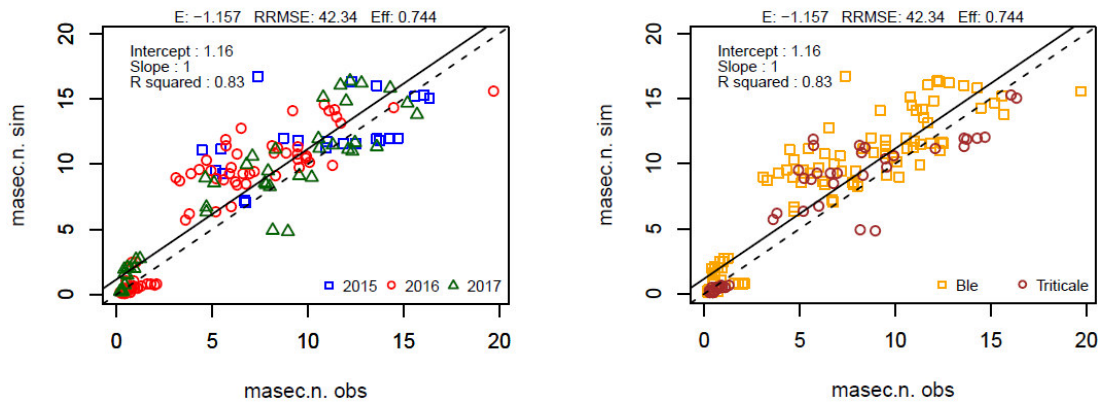


Figure 9. Test de prédiction de la biomasse sèche aérienne ($t MS ha^{-1}$) simulée par rapport aux observations. A gauche détail des trois campagnes et à droite détails des deux cultures, blé et triticale.

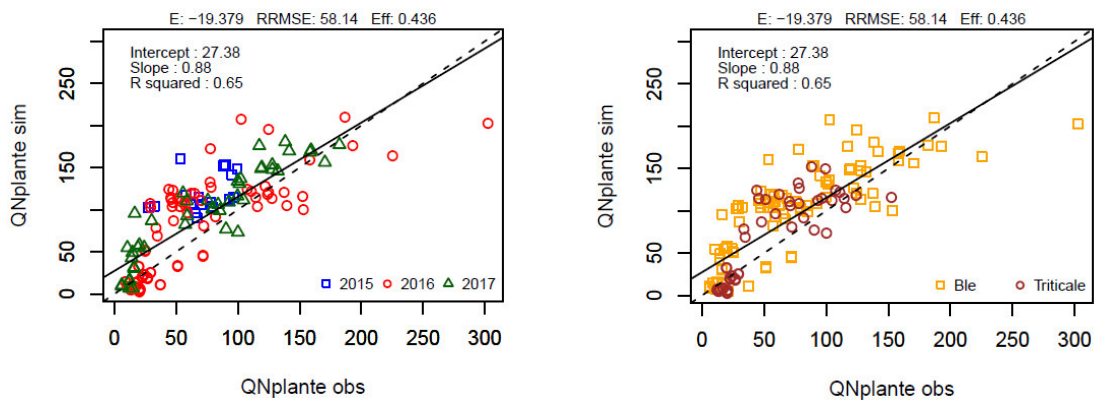


Figure 2. Test de prédiction de la quantité d'azote dans la plante ($kg ha^{-1}$) simulée par rapport aux observations. A gauche détail des trois campagnes et à droite détails des deux cultures, blé et triticale.

La comparaison de la figure 10 peut aussi s'effectuer en cumulant les quantités d'azote des adventices à celles des céréales. Cependant, la taille du jeu de données est moindre puisque la quantité d'azote des adventices n'est pas toujours mesurée en sortie d'hiver quand la biomasse en adventices est trop faible pour effectuer des analyses. Néanmoins cette intégration permet de diminuer le biais du modèle et d'en améliorer l'efficacité (Figure 11). Ce résultat valide l'hypothèse H2 et peut contribuer à expliquer la bonne prédiction des stocks d'eau et d'azote.

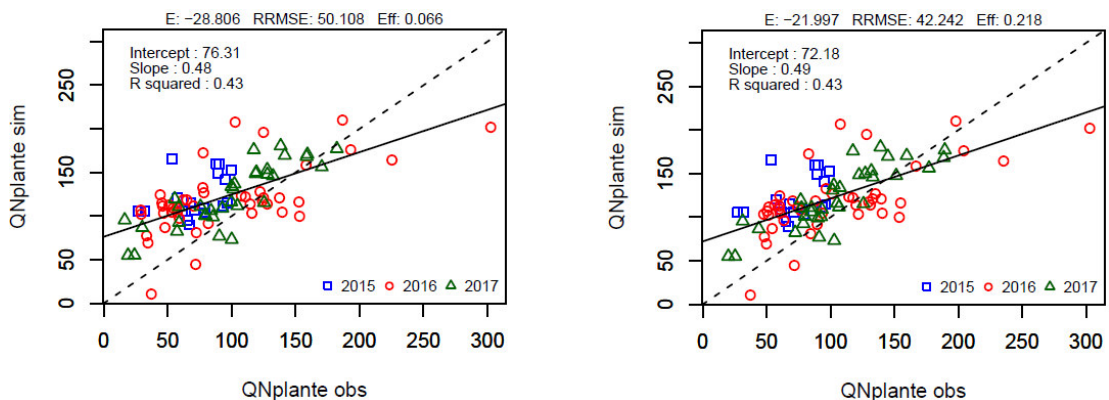


Figure 11. Test de prédiction de la quantité d'azote ($kg ha^{-1}$) simulée par rapport aux observations pour la seule céréale à gauche et pour l'ensemble céréale-adventices à droite

En conclusion, les performances en situation « on farm » AB sont comparables aux références connues en CONV (Coucheney et al., 2015 ; Beaudoin et al., 2008). La tendance à la surestimation de la matière sèche est logique mais ne rend pas caduque l'emploi du modèle en analyse du défaut de rendement, ou « Yield Gap Analysis ».

4.3. Test de la prédiction de la minéralisation et de la lixiviation d'azote en situation AB « on farm » à moyen terme

4.3.1. Minéralisation de l'azote après destruction d'une luzernière

L'objectif est ici de démontrer la capacité du modèle STICS, grâce aux ajouts de formalisme de la version de recherche, à rendre compte des réserves de cultures pérennes, comme la luzerne, et de la minéralisation de ces résidus sur le moyen terme, mais aussi des prédictions des variables agricoles de productions et environnementales.

La luzerne étant une plante pérenne, elle accumule des réserves dans un organe pérenne appelé pivot. Cette partition du C et du N dans ces organes de stockage n'était auparavant pas possible, par manque de formalismes adéquats. Avec la version de recherche, du modèle, et les travaux sur la modélisation de la luzerne (Strullu et al., en préparation) l'objectif est ici de traiter de la capacité du le modèle STICS à rendre compte de la minéralisation de ses résidus. Minéralisation qui fait l'objet d'une hypothèse (H3). Or, grâce à cet ajout dans la version de recherche, il est escompté, en enchaînant les simulations, de pouvoir rendre compte de la minéralisation de l'azote après une légumineuse comme la luzerne.

L'évolution du stock d'azote nitrique est simulée sur des cycles culturaux de 3 ans minimum avec une luzerne sur deux ans (Figure 12). Ces résultats de simulations enchaînés montrent la capacité du modèle, à la fois à simuler correctement les résidus d'une luzerne, mais aussi à rendre compte de leur minéralisation à moyen terme pour les cultures suivantes. Ces résultats sont intéressants car ils permettent désormais d'intégrer dans des scénarii des cultures pérennes et légumineuses, ce qui dans le cadre de l'agriculture biologique est quasi indispensable.

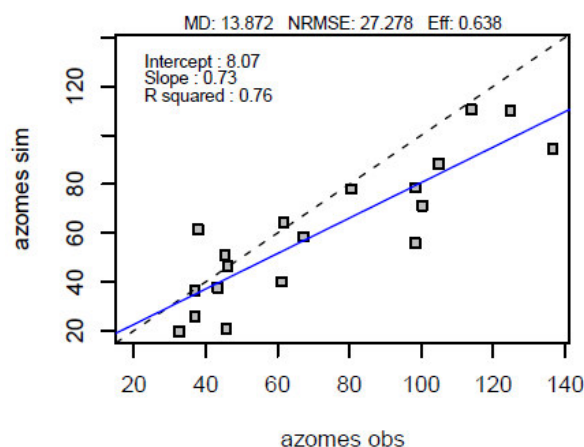


Figure 12. Comparaison du stock d'azote nitrique ($\text{kg N-NO}_3^- \text{ha}^{-1}$) entre valeurs simulées et observées d'une rotation culturale avec luzerne

4.3.2. Test de la prédiction de la teneur sous-racinaire en nitrate à moyen terme

Cette étude s'inscrit dans le cadre du réseau ABAC. L'idée est ici de s'intéresser aux simulations des concentrations sous-racinaires. Cependant il faut préalablement vérifier que les stocks en N-NO_3^- soient correctement prédis par le modèle, sachant que la gestion des bio-agresseurs et notamment des adventices n'est pas aussi poussée qu'en situation expérimentale. L'hypothèse H2 évoque cette problématique de la simulation des stocks d'azote dans des situations où les adventices sont présentes. Il est donc nécessaire de s'assurer de la qualité de la prédiction par le modèle STICS de ces stocks pour des simulations avec des cultures ou associations seules sans adventices qui mèneraient aux même résultats que les observations terrains avec présences d'adventices (Figure 13).

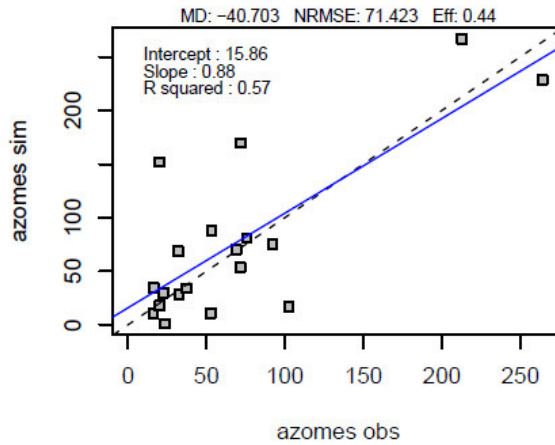


Figure 13. Comparaison des stocks en azote nitrique ($\text{kg N-NO}_3^- \text{ha}^{-1}$) entre valeurs simulées et observées sur 9 parcelles d'une même exploitation en AB du réseau ABAC suivies pendant 3 ans

Ces résultats confirment la possibilité de simuler ces stocks d'azote, quand bien même il y ait présence d'adventices. Cela permet donc d'étudier le devenir de l'azote par lixiviation sachant que le pool de nitrate est correctement rendu.

Les résultats des simulations des concentrations sous-racinaires des 9 parcelles étudiées sont illustrés en figure 14. Ils montrent, en première approche, une capacité globale du modèle STICS à rendre compte de la lixiviation des nitrates par la comparaison mesures effectuées, *via* les bougies poreuses, et simulées par le modèle.

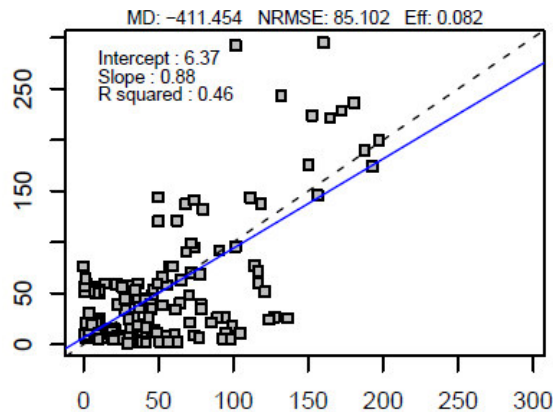


Figure 14. Comparaison des concentrations sous-racinaires d'azote nitrique ($\text{mg N-NO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$) entre valeurs simulées et observées sur 9 parcelles d'une même exploitation en AB du réseau ABAC suivies pendant 3 ans

Ces premiers résultats sont encourageants, car ils illustrent le potentiel du modèle STICS à simuler la concentration sous-racinaire de l'azote dans des systèmes complexes intégrant des apports de PRO et faisant intervenir des associations de cultures en sus d'une diversité culturales importantes. Il reste cependant certaines situations où le modèle sous-estime les concentrations mesurées par les bougies poreuses. Cet écart à la mesure pourrait être lié à une différence entre formalisme de calcul par STICS de ces concentrations sous-racinaires, qui se font sur des couches verticales, et les mesures par les bougies qui captent de façon rayonnante autour du point de mesure.

5. Test de prédiction par le modèle de la production de biomasse sur des dispositifs expérimentaux de long terme

Les résultats de cette partie sont une synthèse des travaux issus de la thèse de Bénédicte Autret (2017). Ils permettent notamment de contrôler la validité du travail précédemment présenté sur des essais de longues durées en enchaînant les simulations notamment sur des variables agronomiques, comme la biomasse aérienne ; cela pour des essais en système conventionnel et biologique.

Les prédictions en simulations continues de long terme sont testées sur les variables production de biomasse aérienne et quantité d'azote de la culture des données des essais du dispositif de Foulum (Danemark) et du dispositif DOK de Therwil (Suisse). Ce test sert de préalable à l'instruction de la question de recherche suivante : « le turn-over des matières organiques peut-il se représenter par les mêmes formalismes en AB et CONV » présentée par Beaudoin et al. (2017, rapport PIREN-Seine)

5.1. Description des deux sites expérimentaux de long terme

Les deux sites expérimentaux de long terme, faisant ici l'objet de l'étude, sont ici présentés succinctement. Le dispositif de Foulum est conduit depuis 1997 (Tableau 2). Le sol est à dominante sableuse. La température annuelle moyenne de l'air est les précipitations annuelles sont respectivement de 8,2 °C et 716 mm. Ce dispositif permet de comparer, deux systèmes de cultures, l'un en agriculture conventionnel avec un apport d'engrais minéral, et l'autre, en agriculture biologique avec ou sans apport d'engrais sous forme organique et dont la rotation culturale est soit différente du système conventionnel soit identique.

Tableau 2. Description des itinéraires techniques du dispositif de Foulum (Danemark)

		Dispositif de Foulum (Danemark)			
Traitements		C4-CC+IF	O4+CC-M	O2+CC-M	O2+CC+M
		Conventionnel	Biologique	Biologique	Biologique
Cultures principales		Avoine - Blé - Triticale - Pois/orge		Orge - Prairie -Blé - Pois/orge	
Cultures intermédiaires		Mélanges variables (ray-grass, chicorée, trèfle, vesce...)			
N minéral	kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	55	-	-	-
N organique		-	-	-	54

Le dispositif DOK est conduit depuis 1978 (Tableau 2). Le sol y est limoneux profond. La température annuelle moyenne de l'air est les précipitations annuelles sont respectivement de 10,7 °C et 860 mm. Ce dispositif permet de comparer deux systèmes agricoles avec des conduites différentes, comme pour le dispositif de Foulum. La rotation culturale est par contre identique entre les différents traitements, mais ceux-ci diffèrent notamment par l'apport ou non d'engrais avec un traitement en AB sans aucun apport de fertilisant.

Tableau 3. Description des itinéraires techniques du dispositif DOK (Suisse)

		Dispositif DOK de Therwil (Suisse)			
Traitements		CONMIN	CONFYM	NOFERT	BIOORG
		Conventionnel	Conventionnel	Biologique	Biologique
Cultures principales		Maïs - blé 1 - soja - pomme de terre - blé 2 - prairie 1 - prairie 2			
Cultures intermédiaires		Mélanges variables (ray-grass, trèfle, vesce...)			
N minéral	kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	97	101	-	-
N organique		-	54	-	94

S'agissant ici d'essais expérimentaux, les traitements biologiques ont été bien maîtrisés en terme de pression biotique. Ainsi, tous les résultats obtenus peuvent être comparés aux résultats de simulations fournis par le modèle STICS.

5.2. Evaluation de la démarche de modélisation sur le long terme

Sur chaque essai, les données du traitement CONV ont servi à paramétrer sommairement certaines espèces orphelines comme la betterave rouge et certains paramètres locaux du sol. Sur les autres traitements, le test est rigoureusement prédictif. Les résultats des simulations de la biomasse aérienne sont présentés à la figure 15. Ceux-ci ont été exécutés sur la version de recherche de STICS en ayant pris soin de paramétrer les fichiers « plante » notamment pour l'allocation de l'azote et le réalisme du profil racinaire.

Ces résultats montrent, avec des simulations enchaînées sur 20 ou 40 ans, une très bonne capacité du modèle à rendre compte de l'évolution de la matière sèche aérienne, tant en système conventionnel que biologique. Cela, permet de confirmer la démarche employée jusqu'ici d'extension du domaine d'application de STICS à l'AB mais aussi de la généricité du modèle, avec un même formalisme, à rendre compte de ces deux modes d'exploitation et de gestion agricole.

L'intérêt de ces travaux et de pouvoir valider la démarche de calibration sur des simulations enchaînées de longue durée et aussi sur une large gamme de fichiers « plante ».

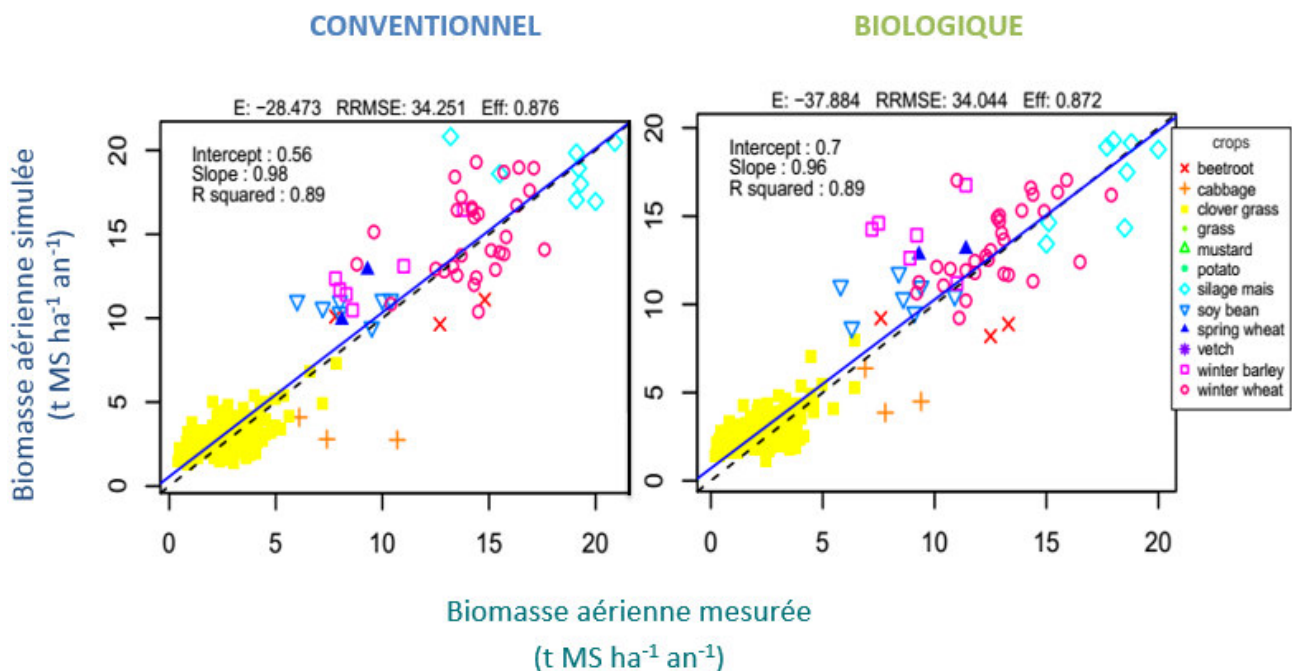


Figure 15. Comparaison entre matière sèche aérienne ($t MS ha^{-1} an^{-1}$) mesurée et simulée en système conventionnel (gauche) et biologique (droite) avec la version de recherche de STICS via des simulations enchaînées

Le modèle a donc correctement simulé la biomasse aérienne de la culture après calibration. Le tableau 4 permet d'aller plus loin, notamment sur des résultats de simulation de la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne. Celle-ci, est également bien simulée après calibration à DOK avec une déviation moyenne de $7 kg N ha^{-1}$ et de $14,5 kg N ha^{-1}$ à Foulum. Ces résultats varient selon les traitements, avec une surestimation générale pour tous les traitements à DOK et pour la seconde rotation du traitement en AB, O2, à Foulum et une sous-estimation pour la première rotation, C4 et O4.

Tableau 4. Résultats de la comparaison entre simulations et observations de la quantité d'azote accumulée dans la biomasse aérienne ($kg N ha^{-1}$) avec la version de recherche de STICS via des simulations enchaînées

Expérimentation	Dispositif de DOK - Therwil						Dispositif de Foulum			
	Traitement	ENBIOexpé Local	CONV	CONV+M	AB	AB+M	CONV	AB+CC	AB+CG	AB+CG+M
			CONMIN	CONFYM	NOFERT	BIOORG	C4-CC+IF	O4+CC-M	O2+CC-M	O2+CC+M
Azote	n		240	240	240	240	58	85	111	107
absorbé	X obs		96	107	61	89	138	93	88	91
total des	X sim		101	114	70	96	121	88	126	133
parties	Déviation moyenne		5	6	10	7	-17	-5	38	42
aériennes	RMSE total		43	48	38	41	62	55	77	89
($kg N ha^{-1}$)	RMSE systématique		24	27	16	22	48	44	40	47
	RMSE aléatoire		35	40	34	34	38	34	66	76

M = Apport de matière organique ; CC = CIPAN ; CG = Clover-Grass, prairie graminée-légumineuse

6. Conclusion générale

Les résultats ici obtenus, *via* la démarche d'adaptation de STICS à l'AB, confirment le bienfondé de la stratégie utilisée pour relever le défi scientifique et technique : utiliser le même modèle en AB et en CONV.

Le défi de la modélisation déterministe est relevé, avec de bons résultats pour le blé d'hiver, mais aussi avec de nouvelles espèces calibrées comme la féverole d'hiver, l'escourgeon, l'orge de printemps, la luzerne ou encore le triticale (non montrés ici).

Ce travail prépare une utilisation par étape du modèle STICS sur des questions scientifiques : test d'hypothèse sur le turn-over des matières organiques, diagnostic de situation pour l'analyse du défaut de rendement (ou « Yield Gap Analysis »), pronostic de la disponibilité en azote (établissement de scénarii), comparaison rigoureuse des impacts AB et CONV par expérimentation numérique.

A l'avenir, continuer le travail de long terme de calibration d'espèces et de la dynamique de minéralisation des PRO, nécessitera de s'appuyer sur jeux de données qualifiés, accompagnés de métadonnées sur leur conditions d'obtention. Ce travail peut s'appuyer sur le fait crucial que disposer d'un modèle commun permet de mutualiser le questionnement scientifique et les bases de données entre CONV et AB.

Bibliographie

- 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.
- Beaudoin, N., M. Launay, E. Sauboua, G. Ponsardin, et B. Mary. 2008. « Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the “on farm” database of Bruyères catchment ». *European Journal of Agronomy* 29 (1):46-57. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.03.001>.
- Beaudoin, N., N. Gallois, P. Viennot, C. Le Bas, T. Puech, C. Schott, S. Buis, et B. Mary. 2016. « Evaluation of a Spatialized Agronomic Model in Predicting Yield and N Leaching at the Scale of the Seine-Normandie Basin ». *Environmental Science and Pollution Research*, septembre, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7478-3>.
- Beaudoin N., B. Mary, B. Autret, L. Rakotovololona, A. Ronceux, M. Bertrand, P. Mäder, J. Olesen, F. Chlébowski, L. Strullu, A. Lengrand, J. Léonard. 2017. « Quantification et modélisation de la production et des bilans C et N en systèmes de culture biologiques (AB) ». Rapport, PIREN-Seine.
- Benoit M., J. Garnier, N. Beaudoin, et G. Billen. 2016. « A participative network of organic and conventional crop farms in the Seine Basin (France) for evaluating nitrate leaching and yield performance »: *Agricultural Systems* 148 (octobre):105-13. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.005>.
- Billen G., V. Thieu, J. Garnier, et M. Silvestre. 2009. « Modelling the N cascade in regional watersheds: The case study of the Seine, Somme and Scheldt rivers ». *Agriculture Ecosystems & Environment - AGR ECOSYST ENVIRON* 133 (octobre). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.018>.
- Brisson N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, 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):311-46. <https://doi.org/10.1051/agro:19980501>.
- Brisson N., M. Launay, B. Mary, N. Beaudoin, Eds., 2009. Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model. INRA Science Update, 297pp
- Coucheney E., S. Buis, M. Launay, J. Constantin, B. Mary, I. Garcia de Cortazar-Atauri, D. Ripoche, N. Beaudoin, F. Ruget, S. Andrianorisoa., C. Le Bas, E. Justes, J. Léonard, 2015. Environmental Modelling & Software. Accuracy, robustness and behavior of the STICS 8.2.2 soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. 64, 177-190
- Corre-Hellou G., M. Faure, M. Launay, N. Brisson, et Y. Crozat. 2009. « Adaptation of the STICS intercrop model to simulate crop growth and N accumulation in pea-barley intercrops ». *Field Crops Research* 113 (1):72-81. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.007>.
- de Wit CT (1978) Simulation of assimilation respiration and transpiration of crops. Simulation Monographs Pudoc Wageningen
- Doltra J., M. Laegdsmand, J. Olesen, 2011. Cereal yield and quality as affected by nitrogen availability in organic and conventional arable crop rotations: A combined modeling and experimental approach. *Europ. J. Agronomy* 34, 83-95.

Fan J., B. McConkey, H. Wang, et H. Janzen. 2016. « Root distribution by depth for temperate agricultural crops ». *Field Crops Research* 189 (mars):68-74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>.

Fontaine L., L. Fourrié, J.F. Garnier, M. Mangin, B. Colomb, M. Carof, A. Aveline, et al. 2012. « Connaître, caractériser et évaluer les rotations en systèmes de grandes cultures biologiques », janvier.

Guichard L, Bockstaller C., Loyce C, Makowski D, 2010. PERSYST, a cropping system model based on local expert knowledge. In: Proceedings of 'Agro2010 the XIth ESA congress, Wery, J, Shili-Touzi I, Perrin A (Eds.), Agropolis international Editions, Montpellier, France, 827-828

Justes, E., B. Mary, et B. Nicolardot. 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 (1-2):171-85. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9966-4>.

Ledoux, E., Gomez, E., Monget, J.M., Viavattene, C., Viennot, P., Ducharne, A., Benoit, M., Mignolet, C., Schott, C., Mary, B., 2007. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Science of the Total Environment*, 375, 33-47.

« Les chiffres en images | Alim'agri ». 2016. Consulté le 2 août 2016. <http://agriculture.gouv.fr/agriculture-et-foret/les-chiffres-en-images>.

Leifeld J., Reiser R., Oberholzer H-R., 2009. Consequences of Conventional versus Organic farming on Soil Carbon: Results from a 27-Year Field Experiment, 2009. *Agronomy Journal*, 101: 1204-1218.

Moreau, P., L. Ruiz, T. Raimbault, F. Vertès, M. O. Cordier, C. Gascuel-Oudou, V. Masson, J. Salmon-Monviola, et P. Durand. 2012. « Modeling the potential benefits of catch-crop introduction in fodder crop rotations in a Western Europe landscape ». *Science of The Total Environment* 437 (Supplement C):276-84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.091>.

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

« STICS - Les principes de fonctionnement ». s.d. Consulté le 20 octobre 2017. <https://www6.paca.inra.fr/stics/Qui-sommes-nous/Presentation-du-modele-Stics/Les-principes-de-fonctionnement>.

Strullu L., Beaudoin N., Atauri I.G.dC., Mary B., 2014. Simulation of biomass and nitrogen dynamics in perennial organs and shoots of *Miscanthus giganteus* using the STICS model. *BioEnergy Research* 7 (4):1253-1269. doi:10.1007/s12155-014-9462-4

Strullu L., Ferchaud F., Yates N., Shield I., Beaudoin N., Garcia de Cortazar-Atauri I., Besnard A., Mary B., 2015. Multisite yield gap analysis of *Miscanthus giganteus* using the STICS model. DOI 10.1007/s12155-014-9462-4. *BioEnergy Research*.

Thieu V., Billen G., Garnier J., Benoît M., 2010. Nitrogen cycling in a hypothetical scenario of generalised organic agriculture in the Seine, Somme and Scheldt watersheds. *Regional Environmental Change*, DOI 10.1007/s10113-010-0142-4.

Zuo, Qiang, Feng Jie, Renduo Zhang, et Lei Meng. 2004. « A Generalized Function of Wheat's Root Length Density Distributions ». *Vadose Zone Journal* 3 (1):271-77. <https://doi.org/10.2113/3.1.271>.