

Juin 2019
volume n°9 / numéro 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Gestion de la fertilisation

AGRONOMIE

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.
Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.
Contact : afa@inrae.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45
Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Antoine MESSÉAN, président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Christine RAWSKI, Rédactrice en chef Cahiers Agricultures, Cirad
Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad
Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Héloïse BOURREAU, ingénieure à la Bergerie de Villarceaux
- Camille DUMAT, enseignante chercheuse à l'ENSAT/INPT
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Laure HOSSARD, ingénieure de recherche Inra Sad
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Antoine MESSEAN, Ingénieur de recherches, Inra
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Marc MIQUEL, consultant
- Bertrand OMON, Chambre d'agriculture de l'Eure
- Thierry PAPILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, Cirad
- Jean-Marie SERONIE, consultant

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistante éditoriale

Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément

(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

7 AVANT-PROPOS

7 Avant-propos

A. MESSÉAN Président de l'AFA et O. RÉCHAUCHÈRE Rédacteur en chef

9 Éditorial

O. RÉCHAUCHÈRE et M.H. JEUFFROY, coordonnateurs du numéro



11 ENTREE EN MATIERE / PREAMBULE / CONTEXTE GLOBAL

13 De la fertilisation des cultures à la cascade de l'azote

P. CELLIER

19 ECLAIRAGES SUR LA GESTION ACTUELLE DE LA FERTILISATION DES CULTURES

21 Comparaison de la multifonctionnalité relative aux flux azotés induits par dix cultures de légumineuses

Maé GUINET - Bernard NICOLARDOT - Anne-Sophie VOISIN

31 Gestion de l'azote sur le blé biologique en Île-de-France

Charlotte GLACHANT

41 Rappels réglementaires sur l'utilisation des engrais et amendements organiques en agriculture biologique

Blaise LECLERC

43 LES NOUVELLES APPROCHES DE LA FERTILISATION

45 50 ans de méthode du Bilan : progrès passés et limites actuelles

Jean-Marc MEYNARD et Marie-Hélène JEUFFROY

55 Une nouvelle approche de la fertilisation des cultures

G. LEMAIRE

65 APPI-N : une nouvelle approche pour le raisonnement de la fertilisation azotée du blé

Marie-Hélène JEUFFROY, Clémence RAVIER, Arthur LENOIR, Jean-Marc MEYNARD

75 Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN : approche « CHN-conduite »

B. SOENEN, M. BONNEFOY, C. DELPECH, B. PIQUEMAL, P. DESCAZEUX, F. DEGAN, F. LAURENT

87 Évaluation de la disponibilité et la gestion du phosphore dans les agrosystèmes : avancées scientifiques et techniques

Alain MOLLIER, Pascal DENOROY, Christian MOREL

99 Penser la gestion de l'azote autrement : témoignage sur le BAC du Tremblay-Omonville

Marine GRATECAP

105 Nouvelle approche de la fertilisation azotée pour répondre à de nouveaux enjeux : « revaloriser l'expertise agronomique des conseillers et des agriculteurs ».

Entretien avec Bertrand OMON

Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN : approche « CHN-conduite »

B. SOENEN⁽¹⁾, M. BONNEFOY⁽²⁾, C. DELPECH⁽¹⁾, B. PIQUEMAL⁽³⁾, P. DESCAZEUX⁽³⁾, F. DEGAN⁽³⁾, F. LAURENT⁽⁴⁾

⁽¹⁾ ARVALIS - Institut du végétal Baziège (France, 31), b.soenen@arvalis.fr

⁽²⁾ ARVALIS - Institut du végétal Ouzouer-le-Marché (France, 41)

⁽³⁾ ARVALIS - Institut du végétal Boigneville (France, 91)

⁽⁴⁾ ARVALIS - Institut du végétal Paris (France, 75)

Résumé

Avec l'évolution rapide ces dernières années de la puissance de calcul et des outils de traitement de données, elles-mêmes de plus en plus nombreuses, il est aujourd'hui possible de valoriser de façon performante les connaissances de diverses disciplines comme l'agronomie, les sciences du sol et l'écophysiologie, au sein de modèles de culture capables d'intégrer des données issues de sources variées. CHN est un modèle de culture qui a été développé par Arvalis-Institut du Végétal avec comme objectif de pouvoir être utilisé comme outil d'aide à la décision en cours de campagne. Il est donc possible de simuler avec CHN la croissance des cultures et ses facteurs limitants, en temps réel et en anticipation grâce au calcul fréquentiel, permettant ainsi de piloter la fertilisation azotée. Les performances du modèle, dans des contextes très variés de stress hydrique et azoté, sont présentées, ainsi que des travaux de construction et de validation d'outils de pilotage des apports d'azote sur blé.

L'enjeu réside aussi dans la possibilité de valoriser en temps réel les sources de données de plus en plus nombreuses et diverses pour accompagner la prise de décision. Un couplage de ce modèle de culture avec la proxymétrie (utilisant la photographie par exemple), voire la télédétection (images multispectrales via satellite, avion ou drone par exemple), est donc envisagé à court terme. Les techniques d'assimilation de données sont nécessaires pour valoriser en temps réel les mesures issues des capteurs plante, comme notamment la surface foliaire et la teneur en chlorophylle.

Abstract

Thanks to the fast evolution of computing power and the increasing number of data processing tools over the last few years, knowledge of various scientific disciplines such as agronomy, soil science or crop physiology can be efficiently used into crop models able to integrate data from

multiple sources. CHN is a crop model developed by ARVALIS – Institut du Végétal which first purpose is to be used during the cropping season. CHN is able to simulate crop growth and its limiting factors, in real time and in anticipation thanks to frequency calculations, thus allowing to manage nitrogen fertilization. The model's performances are presented for very diverse water and nitrogen stress situations, as well as on-going work about building and validating crop management tools for nitrogen on wheat.

The aim of the model is also to add value through real time decision-making processes to multiple data sources. Pairing this crop model with proxymetry (oriented photographs) or remote sensing (multispectral data by satellite, plane or UAV images) is therefore considered in the short term. Using data assimilation methods is required to make use in real time of measurements from plant sensors, such as leaf area index and chlorophyll content.

Mots-clés : Azote ; Indice de Nutri Azotée (INN) ; Pilotage ; Modélisation ; Céréales à paille

Introduction

Améliorer l'autonomie des systèmes de production végétale vis-à-vis des engrais azotés de synthèse, tout en maintenant des objectifs de production quantitatifs et qualitatifs compatibles avec la demande du marché, est un des objectifs majeurs des programmes de recherche agronomique conduits depuis 25 ans. Parmi les voies disponibles pour y parvenir, l'amélioration de la valorisation de l'azote apporté au blé (par des engrais ou via les fournitures du sol) a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques et techniques (Cohan *et al.*, 2018). Depuis sa création, la méthode du bilan prévisionnel de l'azote a servi de socle à tous les outils de raisonnement mis à disposition des agriculteurs (Hébert, 1969 ; ITCF, 1978 ; Hénin, 1980), et a aussi été intégrée dans le cadre réglementaire de la Directive Nitrates (2011, articles R.211-75 à R.211-84 du code de l'environnement). Bien qu'ayant rendu de grands services, ses limites posent actuellement question (Ravier *et al.*, 2016). Notamment, les controverses autour de la fixation de l'objectif de rendement et l'absence de prise en compte des conditions climatiques de l'année sur les fournitures d'azote du sol.

A partir du début des années 90, des outils de pilotage des apports d'azote en cours de culture ont été mis au point. D'abord basés sur l'analyse de jus de bas de tige (par exemple Jubil® INRA-ARVALIS, Justes *et al.*, 1990), puis rapidement des mesures par transmittance de la teneur en chlorophylle (par exemple YARA N-TESTER® YARA-ARVALIS), puis par réflectance (par exemple FARMSTAR™ ARVALIS-AIRBUS-TERRES INOVIA). Leur utilisation permet d'augmenter significativement la proportion de conseils de dose proches de l'optimum comparativement à l'utilisation d'un bilan prévisionnel seul (Cohan *et al.*, 2011). Les programmes de recherche se poursuivent pour améliorer sans cesse la performance de ces outils de pilotage de la fertilisation azotée (Soenen *et al.*, 2017). Malgré les progrès permis par ces avancées scientifiques, il existe encore une marge de progrès importante. Plusieurs raisons peuvent expliquer les situations de sous-fertilisation ou de sur-fertilisation, malgré l'utilisation d'outils de pi-

lotage de l'apport fin montaison en complément de la méthode des bilans :

- la dose totale d'azote est fortement conditionnée par les hypothèses sur l'objectif de rendement (basé sur l'historique parcellaire), même avec l'utilisation des outils de pilotage.

- piloter uniquement le dernier apport n'est pas toujours suffisant pour s'adapter à l'année,

- les flux azotés sol-plante ne sont pas pris en compte lors du pronostic des OAD actuels. Ces derniers font l'hypothèse que les apports azotés précédents ont été entièrement valorisés lors du diagnostic, ce qui n'est pas le cas lors d'un manque de précipitations après l'apport début montaison,

- les interactions eau-azote, en particulier les situations de conditions hydriques limitantes, ne sont pas toujours prises en compte.

Grâce aux progrès technologiques et aux connaissances agronomiques de mieux en mieux formalisées au sein de modèles de culture, il est devenu possible d'imaginer de nouveaux types d'outils de raisonnement de la fertilisation azotée s'affranchissant des limites des outils actuels cités précédemment. Dans le milieu des années 2000, des travaux exploratoires ont montré qu'il était possible d'utiliser le suivi de l'indice de nutrition azotée, ou INN (Justes *et al.*, 1994), pour piloter la fertilisation azotée du blé, tout en tolérant des carences azotées en début de cycle non préjudiciables pour le rendement (Jeuffroy & Bouchard, 1999 ; Gate, 2007). Plus récemment, ARVALIS – Institut du Végétal et l'INRA - UMR Agronomie et UMR SAD-APT - ont financé et encadré une thèse (Clémence Ravier, 2013-2016) visant à mettre au point un nouveau mode de raisonnement de la fertilisation azotée (Ravier *et al.*, 2017a) dont le principe est de suivre en continu l'état de nutrition azotée du blé afin de déclencher des apports selon des trajectoires d'INN prédéfinies (Ravier *et al.*, 2017b), et en tenant compte des conditions climatiques.

Depuis maintenant plusieurs années, Arvalis-Institut du Végétal met au point un modèle de culture dynamique nommé « CHN » afin de répondre à ses besoins de modélisation des flux de carbone (C), d'eau (H pour H₂O) et d'azote (N) au sein des systèmes de culture. Ce modèle possède trois compartiments, le sol, la plante et l'atmosphère, et est connecté aux bases de données d'Arvalis pour le sol, la météo, les engrais et les variétés. Actuellement, CHN est paramétré sur blé tendre, blé dur et maïs. Des travaux sont également en cours pour paramétrer ce modèle sur l'orge d'hiver et l'orge de printemps.

Avec l'évolution rapide de la puissance de calcul et des outils

de traitement des données, les premières valorisations agronomiques de ce modèle vont voir ou ont déjà vu le jour (Soenen *et al.*, 2015). C'est dans ce cadre qu'Arvalis a évalué la faisabilité d'utiliser CHN pour suivre en continu le statut azoté des céréales, en vue de l'intégrer dans ses outils de pilotage de l'azote.

Matériel et méthodes

CHN : un modèle de culture dynamique

CHN est un modèle dont le principal objectif est d'être utilisé durant la campagne agricole à travers des outils d'aide à la décision. Il a été conçu comme un modèle « expert » réunissant les connaissances de nombreux domaines comme l'éco-physiologie (dont la phénologie), l'agronomie (dont les fonctionnements hydriques, azotés et carbonés des systèmes agricoles), la pédologie, la météorologie et aussi la génétique (Soenen *et al.*, 2016).

CHN est un modèle de culture mécaniste qui simule les flux de carbone, d'eau et d'azote au sein du continuum sol-plante-atmosphère. En interaction avec ces trois compartiments, le modèle s'articule autour de 3 modules principaux :

- Le module « carbone » (C), avec pour le compartiment sol les formalismes et le paramétrage du modèle AMG partagé avec l'INRA, AGROTRANSFERT Ressources & Territoires et le LDAR, et, pour le compartiment plante, l'utilisation du principe d'accumulation du carbone de Monteith (Monteith et Moss, 1977) ;
- Le module « eau » (H), comprenant un modèle de bilan hydrique ayant la particularité de distinguer évaporation et transpiration, est inspiré des travaux de J. Lecoeur (Lecoeur, 2000) et du modèle PILOTE (Khaledian *et al.*, 2009) ;
- Le module « azote » (N), mettant en œuvre pour le compartiment sol de nombreux formalismes basés sur les références du COMIFER (COMIFER, 2013), sur la bibliographie scientifique ainsi que des travaux propres à l'institut, et utilisant pour le compartiment plante le principe de l'indice de nutrition azotée (Justes *et al.*, 1994). Quatre formes d'azote sont prises en compte : l'azote organique, l'urée, l'ammoniac et le nitrate.

Les calculs sont effectués quotidiennement et sur chaque couche de 1cm d'épaisseur du sol. La Figure 1 présente le synoptique du modèle de culture CHN avec la plupart des mécanismes qui y sont simulés.

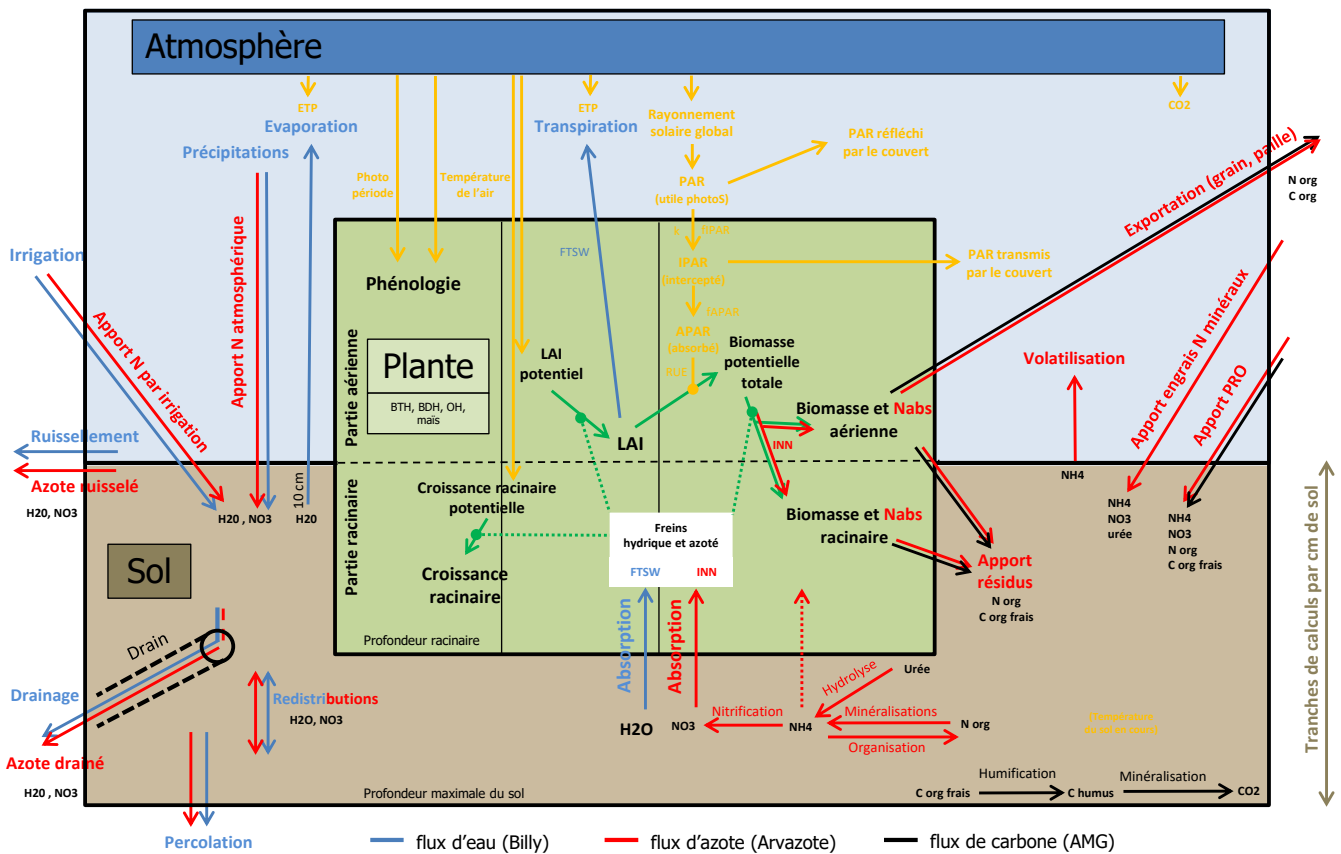


Figure 1 – Synoptique du modèle de culture CHN

Le compartiment sol est connecté à une base de données créée et gérée par ARVALIS, qui contient près de 500 types de sols avec une description fine¹ de chacun des horizons. Chaque sol de la base est identifié selon quelques caractéristiques clés qui permettent son identification : teneur en calcaire, pierrosité, texture du sol, profondeur et hydromorphie. La base de données recense les différents types de sols par régions administratives pour alléger les menus de choix proposés à l'utilisateur. Des fonctions de pédotransfert sont également utilisées pour estimer quelques caractéristiques agronomiques utiles à CHN, comme la densité apparente ou la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Dans un mode d'utilisateur « expert », les données mesurées sur site sont également intégrables.

Le compartiment atmosphère est connecté à une base de données météorologiques, qui réunit des informations quotidiennes sur la France métropolitaine. ARVALIS a accès aux données de plus de 700 stations météorologiques et a conservé un historique de ces données sur plus de 25 ans dans certains cas. De plus des modèles de spatialisation de la donnée météo ont été développés.

Le compartiment plante est basé sur le principe de Monteith (Monteith et Moss, 1977) : la croissance foliaire est modélisée, selon un formalisme inspiré de Baret (Baret, 1986), et la surface foliaire (LAI en anglais pour Leaf Area Index) intercepte le rayonnement solaire qui est ensuite converti en production de biomasse. La croissance racinaire est aussi modélisée et permet d'estimer les quantités d'azote et d'eau disponibles pour la plante. La croissance foliaire et la création de biomasse sont également affectées par des stress liés aux disponibilités en eau et en azote, selon des fonctions de réponse

inspirées des travaux de Sinclair (Sinclair, 1986). La biomasse totale produite est ensuite partitionnée entre les parties aériennes et les parties racinaires, selon les principes formalisés par Savary (Savary et Willocquet, 2012). Le développement de la culture est simulé avec les modèles phénologiques d'ARVALIS, établis et éprouvés au cours de 20 années de recherche (Le Bris *et al.*, 2015), également connectés à des bases de données variétés contenant plus de 400 variétés de maïs, 350 de blé tendre et 50 de blé dur. Cette base de variétés est mise à jour chaque année, avec l'ajout des variétés les plus récentes.

Les flux de carbone suivent les principes du modèle AMG (Andriulo *et al.*, 1999), qui a été implémenté dans CHN avec des formalismes et paramétrages communs aux organismes concepteurs (INRA, AGROTRANSFERT Ressources & Territoires et LDAR). Ce module permet de simuler l'évolution du stock de carbone organique du sol sur le long terme.

Concernant **les flux d'eau**, ARVALIS a développé un modèle d'équilibre du bilan hydrique, dont la particularité est de distinguer l'évaporation des dix premiers centimètres du sol, de la transpiration de la plante. Ce modèle a été inspiré par les travaux de Jérémie Lecoer (Lecoer, 2000) et par d'autres modèles d'équilibre du bilan hydrique, comme PILOTE de l'IRSTEA (Khaledian *et al.*, 2009). Chaque jour, les calculs du modèle s'enchaînent selon l'ordre chronologique suivant :

- estimation de la transpiration maximale de la plante, dépendante de la surface foliaire et de la demande climatique via l'ETP,
- évaluation de la pluie efficace, stockage dans la première couche du sol et par conséquent estimation du ruissellement,

¹ 71 variables quantitatives ou qualitatives.

- calcul de l'évaporation et de la transpiration réelle couche par couche du compartiment évaporant,
- estimation de la quantité d'eau extraite par le système racinaire, selon les principes d'une loi d'offre et de la demande,
- simulation des transferts d'eau dans le profil du sol, avec dans l'ordre percolation, drainage, saturation et redistribution par la microporosité.

Pour **les flux d'azote**, CHN fait intervenir son propre équilibre entre l'offre du sol et la demande de la plante, qui utilise les formalismes de simulation basés sur les références du COMIFER (COMIFER, 2013), la bibliographie scientifique et des travaux propres à l'institut. Quatre formes de l'azote sont prises en compte dans CHN : l'azote organique, l'urée, l'ammoniac et le nitrate. Chaque jour, CHN actualise les stocks d'azote dans chaque tranche centimétrique du sol, en fonction des flux suivants :

- les apports d'engrais azotés minéraux ou organiques, qui doivent être renseignés par l'utilisateur en s'appuyant sur les bases de données d'engrais minéraux et de produits résiduels organiques de l'institut,
- les apports atmosphériques et les éventuels apports d'azote via l'eau d'irrigation, dont la teneur en nitrate est un paramètre d'entrée du modèle,
- les fournitures du sol, regroupant la minéralisation de l'humus, la minéralisation des résidus de la culture précédente (Nicolardot *et al.*, 2001) et de la culture intermédiaire (Justes *et al.*, 2009), la minéralisation des produits résiduels organiques (Bouthier *et al.*, 2009), ainsi que la minéralisation due à un retournement de prairies (Laurent *et al.*, 2004), qui dépendent du calcul des jours normalisés (Mary *et al.*, 1999),
- la fixation symbiotique des légumineuses,
- les pertes aux dépens de l'engrais (volatilisation et organisation),
- les pertes liées au fonctionnement hydrique des sols (ruissellement, drainage et lixiviation), utilisant le modèle de Burns (Burns, 1976),
- les flux entre tranches (soit 1 cm de sol), regroupant la diffusion, la redistribution et l'homogénéisation suite à un travail du sol,
- et enfin le prélèvement d'azote par la plante, faisant intervenir la notion de teneur en azote critique (Justes *et al.*, 1994).

Le choix d'ARVALIS de développer son propre modèle de culture vient principalement de la nécessité de fonctionner, en temps réel et en projection (prévision) jusqu'à la fin de la campagne grâce aux calculs fréquentiels. En effet, à la différence de nombreux autres modèles de culture (APSIM, STICS, CERES...), CHN a été conçu dans un but opérationnel, pour être « le cœur de calcul » utilisé en cours de campagne et intégré à des outils d'aide à la décision permettant la prévision de la croissance de la culture et son pilotage.

CHN a donc été intégré dans le système d'information de l'institut (logiciel Panoramix) afin de pouvoir bénéficier de ses avantages : modèles préexistants (comme les modèles phénologiques par exemple), calcul fréquentiel automatisé, connexion aux bases de données techniques internes (sols, variétés, engrais, météo).

Pour finir, l'avantage pour ARVALIS de disposer de son propre modèle réside également dans un meilleur contrôle et maintien du code informatique, dans un souci de performance et de temps de calcul optimisé, facteurs décisifs dans une stratégie d'offre de services auprès d'organismes économiques ou de développement.

Un puissant jeu de données français pour le paramétrage de CHN

Un important travail de validation du modèle de culture CHN est mené depuis 2013 sur blé tendre, blé dur et maïs. Ce travail s'appuie sur un large jeu de données français, issu des essais Arvalis-Institut du Végétal menés sur ces trois espèces de grande culture.

En maïs par exemple, la base de données rassemble 29 années d'essais et compte 683 « situations » (modalités d'essais), avec au total un peu plus de 10000 mesures sur la plante et le sol (Tableau 1). Ces essais ont été menés sur 28 sites différents répartis sur 18 départements (Figure 2), et regroupent ainsi une large diversité de contextes agro-pédoclimatiques (sables des Landes, terres noires des Pyrénées-Atlantiques, terres de groies du Poitou-Charentes...), et des scénarios variés en termes de stress hydrique et/ou azoté (Figure 3). La même démarche a été adoptée pour la constitution des bases de données des autres espèces, avec une sélection d'essais bien répartis au sein des grands bassins de production pour chaque espèce (Figure 2), et contenant un nombre de mesures sur la plante et sur le sol suffisant (Tableau 1) pour permettre une validation statistique robuste du modèle.

	An- nées	Nombre de sites	Nombre de trai- te- ments	Nombre de me- sures sol	Nombre de me- sures plante
Mais	1988- 2016	28	683	11327	11534
Blé tendre	2000- 2014	34	585	3463	7614
Blé dur	1992- 2014	33	416	2084	3810

Tableau 1 – Description du jeu de données de validation de CHN

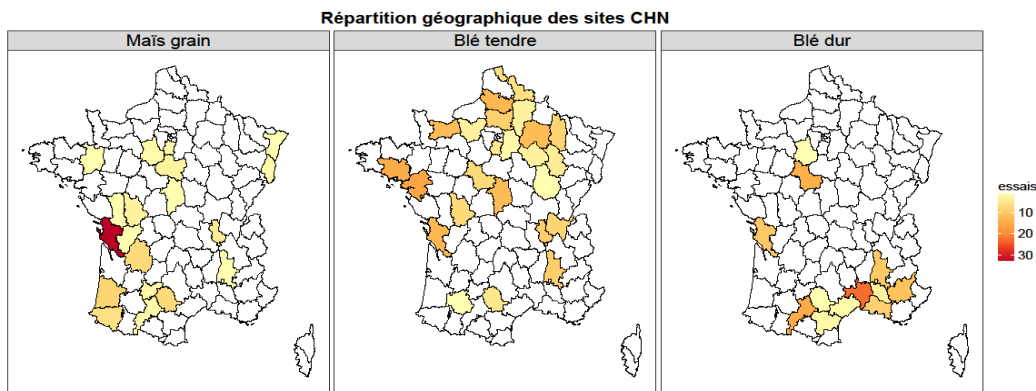


Figure 2 – Distribution géographique des essais ayant servi à la validation du modèle CHN

Les bases de données de chaque espèce regroupent ainsi à la fois des essais variétés, irrigation, fertilisation, densité de semis... En maïs, on dispose d'une majorité d'essais « irrigation », ce qui explique le nombre très élevé de mesures sur sol (suivi de l'humidité du sol par sonde pour le pilotage de l'irrigation et l'estimation des consommations en eau) comparativement aux autres espèces (tableau 1), alors qu'en blé on recense essentiellement des essais variétés et fertilisation

azotée. Cela se traduit aussi par une différence de distribution des situations en termes de stress hydrique et azoté (Figure 3) : en maïs, on rencontre de nombreuses situations sous stress hydrique ($ETR/ETM < 1$) mais par contre très peu de situations sous stress azoté ($INN \text{ floraison} < 1$), alors qu'en céréales à paille, on dispose d'une large gamme d'intensité de stress azoté. On note cependant aussi une bonne proportion de situations sous stress hydrique en blé.

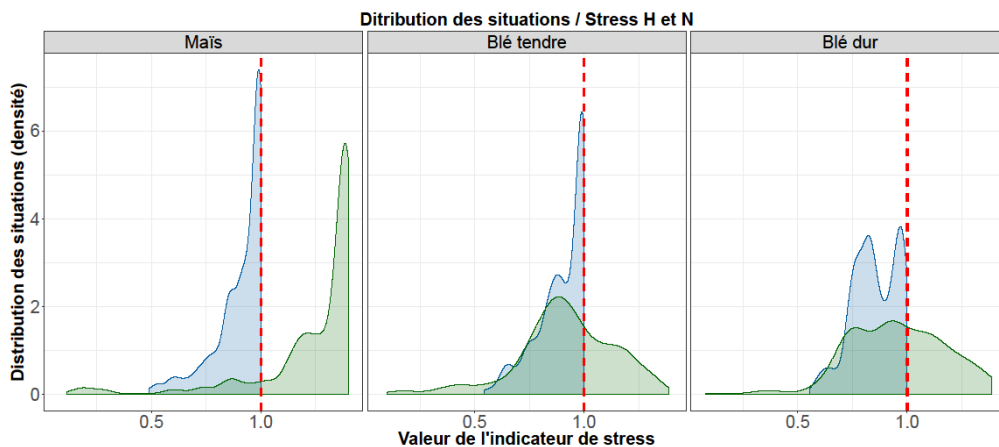


Figure 3 – Distribution des situations (courbes de densité) par rapport aux valeurs des indicateurs de stress hydrique (rapport ETR/ETM de semis à récolte : courbe bleue) et azoté (INN à floraison : courbe verte)

Les essais sélectionnés sont, pour la majorité, bien caractérisés : à chaque site est associé un type de sol issu de la base sol de l'institut, et dont les caractéristiques ont été personnalisées lorsque cela était possible, ainsi qu'une station météorologique issue de la base météo d'Arvalis. Les itinéraires techniques influant sur les sorties du modèle sont également renseignés (travail du sol, fertilisation minérale et/ou organique et irrigation).

Les mesures sur sol comprennent essentiellement des mesures d'humidité (sondes capacitives ou sondes à neutrons, étalonnés sur quelques sites) et des mesures de stock d'azote minéral ($N-NO_3/N-NH_4^+$). Ces mesures ont permis en partie de valider les modules de bilan hydrique et de bilan azoté sur le compartiment sol de CHN. Les mesures « plante » sont pour l'essentiel des mesures d'indice foliaire (surtout en maïs, plus rares sur blé tendre), de biomasse et de teneur en azote, ayant servi au paramétrage et à la validation des modèles de croissance du compartiment « plante » de CHN. Les performances d'ajustement des paramètres ne seront pas abordées dans cet article. Mais une approche de validation sur un jeu de données indépendant sera présentée.

Valorisation de CHN pour la mise au point du pilotage intégral de l'azote : approche « CHN-conduite »

L'approche dite « CHN-conduite », consiste à valoriser les sorties du modèle de culture CHN, pour la mise au point du pilotage intégral de l'azote. Ces travaux reprennent les enseignements de la thèse de Clémence Ravier (Ravier *et al.*, 2017b), en utilisant la dynamique d'INN minimum à ne pas franchir (Figure 4a). Dans l'approche « CHN-conduite », l'INN est suivi avec le modèle CHN et permet de déterminer l'opportunité d'un apport d'azote. Si les principes du suivi de l'INN ont été repris, la représentation qui en est faite consiste à suivre la quantité d'azote absorbé (QNabs), afin de prendre en compte le niveau de biomasse très variable d'un contexte à l'autre. C'est donc la simulation de QNabs qui est utilisée pour calculer la dose à apporter en temps réel et pour chaque contexte pédoclimatique distinct, en utilisant le calcul fréquentiel de CHN (Figure 4c). Ainsi, pour corriger un même niveau de carence ($INN=0.7$ par exemple), la dose préconisée sera différente d'un contexte pédoclimatique à l'autre, en fonc-

tion du niveau de biomasse (25 et 50 kgN/ha pour une biomasse respectivement de 3 et 6 tMS/ha par exemple) et du climat anticipé par approche fréquentielle (climat médian ou correspondant à différents déciles).

Pour les deux premières années d'expérimentation, des « rendez-vous » réguliers ont été fixés *a priori* pour conditionner le fractionnement et éviter l'installation de carences azotées trop intenses (INN inférieur à la trajectoire d'INN minimum) au risque de ne plus pouvoir les lever et ainsi de limiter la croissance du peuplement de façon irrémédiable. Ainsi des apports pourront être déclenchés afin d'atteindre un niveau

d'INN optimal au prochain « rendez-vous » (stade épi 1 cm, dernière feuille étalée et floraison). Pour la campagne 2019-2020, il est prévu d'introduire un module d'optimisation des « rendez-vous », afin de viser les fenêtres climatiques maximisant l'utilisation de l'azote de l'engrais (caractérisée par le coefficient apparent d'utilisation ou CAU).

En parallèle, l'azote minéral disponible sur la profondeur d'enracinement est suivi (Figure 4b), afin de distinguer les carences azotées vraies, qui nécessitent un apport, des carences azotées induites par un stress hydrique, qui, elles, ne justifient pas un ravitaillement.

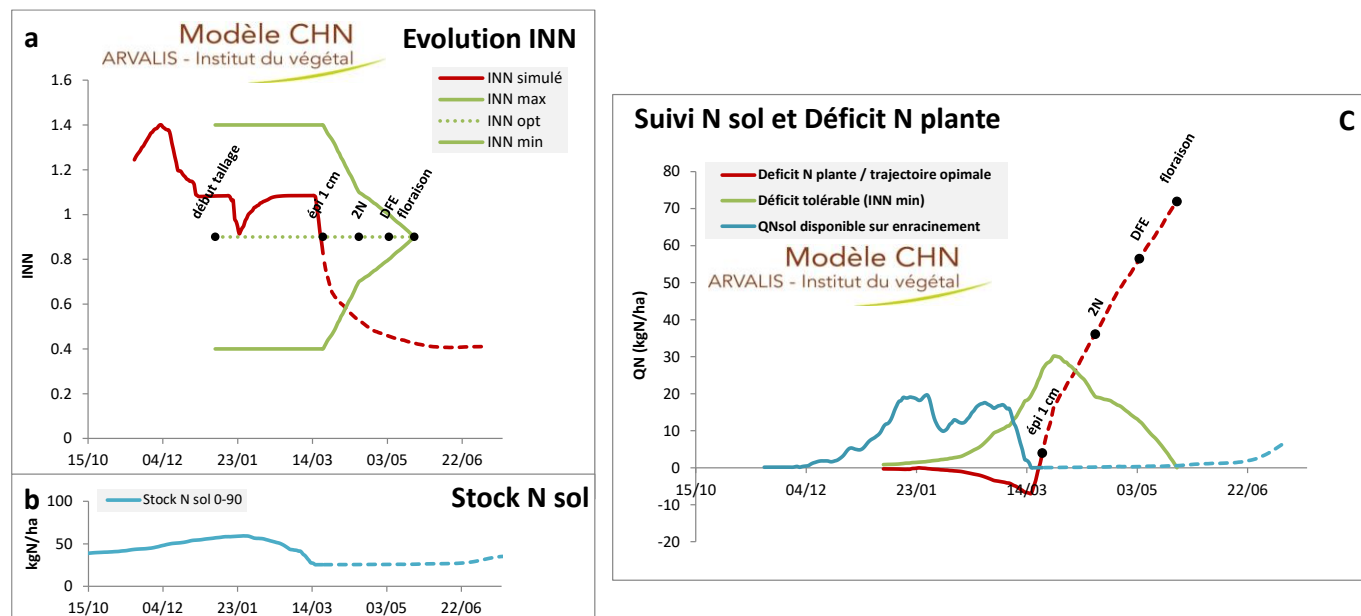


Figure 4 – Exemple de suivi de l'INN (a), des fournitures en azote du sol (b) et de la quantité d'azote absorbé - exprimée en déficit d'azote total /INN optimal - (c) avec CHN. La simulation avec les données météo réelles est en train plein, et l'utilisation des prévisions puis du fréquentiel en pointillés

Différentes règles de décision sont testées, notamment pour prendre en compte l'enjeu de la teneur en protéines, avec un objectif à atteindre de 11.5% sur blé tendre et de 14% sur blé dur. L'effet variétal sur la teneur en protéines est incontournable et doit être pris en compte dans cette approche. Les travaux récents sur la révision des besoins unitaires du blé, pour tenir compte de cet enjeu (Le Souder *et al.*, 2017), peuvent être mobilisés dans cette étude. En effet une variété ayant un bc nul (bc : besoin en azote complémentaire au besoin pour le rendement à l'optimum pour satisfaire la teneur en protéines requise) signifie qu'elle atteint en moyenne l'objectif de teneur en protéines à l'optimum de fertilisation azotée pour le rendement et donc qu'un INN à la floraison de 0.9 devrait permettre d'atteindre cet objectif. *A contrario*, une variété présentant un bc non nul, aura besoin d'un INN floraison supérieur à 0.9 pour atteindre l'objectif de teneur en protéines. Pour les variétés présentant des bc de 0.2, 0.4 et 0.6,

des objectifs d'INN floraison de respectivement 1, 1.1 et 1.2 ont donc été fixés. Ces valeurs ont été obtenues par simple calcul physiologique (azote à absorber en supplément par rapport à la référence rendement - INN floraison de 0.9 - nécessaire pour atteindre l'objectif de teneur en protéines), ces seuils pourront être remis en question à la lumière des premiers résultats.

Afin d'évaluer les performances agronomiques de cette approche, un réseau d'essais a été initié au cours de la campagne 2016-2017. Après deux années d'expérimentation, ce réseau totalise 98 essais CHN-conduite sur blé tendre et 18 sur blé dur dans les principaux bassins de production français (Figure 5) et a mobilisé un grand nombre de partenaires (Tableau 2). Un réseau d'essais CHN-conduite a également été initié sur maïs, mais les résultats ne seront pas abordés dans cet article.

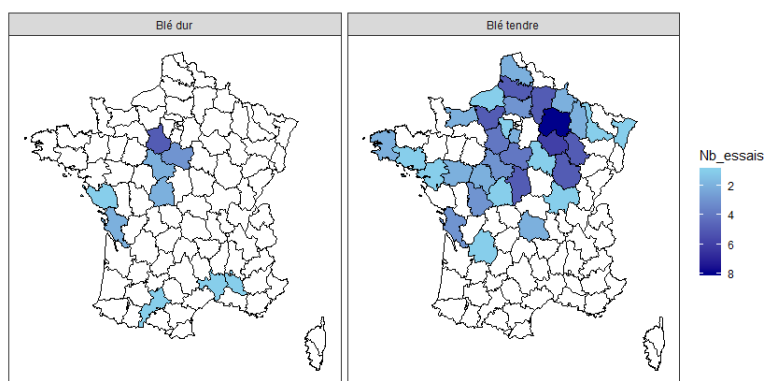


Figure 5 – Distribution géographique des essais CHN-conduite sur les campagnes 206-2017 et 2017-2018

	Partenaires
Chambres d'agricultures	CA02, CA10, CA17, FDGEDA18, CA27, CA28, CA36, CA37, CA41, CA45, CA51, CA52, CA76, CA80, CA89, CRA IDF
Coopératives / Négoces	Acolyance, AGORA, AgroPithiviers, Axereal, Bourgogne du Sud, CapSeine, CAVAC, CECAB, CERENA, Coop. de Bonneval, Coop. De Tricherie, Dijon Céréales, EMC2, Epi-test, Seine-Yonne, SCAEL, Soufflet, Ternoveo, Terre Atlantique, UNEAL, ValEpi, Vivescia
CETA	CETA CB, CETA de Romilly, GRCETA 14, GRCETA 27

Tableau 2 – Liste des partenaires impliqués dans les essais CHN-conduite sur les campagnes 2016-2017 et 2017-2018

Les rendements, teneurs en protéines et CAU obtenus pour chaque variante des règles de décision testées, sont comparés à une courbe de réponse à l'azote dont le fractionnement correspond aux pratiques locales recommandées avec la méthode des bilans. Les optimums sont déterminés *a posteriori* par ajustement statistique des courbes de réponse. Un modèle quadratique-plateau est utilisé pour le rendement, un modèle linéaire (excluant le témoin non fertilisé) pour la teneur en protéines et un modèle bilinéaire pour l'azote absorbé plante entière.

Des mesures de biomasse et d'azote absorbé ont également été réalisées en cours de campagne, afin d'évaluer les performances de prédiction de CHN sur le compartiment plante. Une comparaison de ces mesures aux simulations du modèle a été réalisée en s'appuyant sur les indicateurs statistiques classiques (biais, RMSE et efficacité). Ce jeu de données

étant indépendant de celui utilisé pour l'optimisation des paramètres de CHN, la performance de prédiction du modèle de culture peut être déterminée.

Résultats et discussion

Les performances de prédiction des modèles « plante » de CHN

L'estimation de la biomasse et de l'azote absorbé avec CHN est globalement satisfaisante sur les cultures étudiées, avec des efficacités moyennes supérieures à 0.6 et des biais négligeables (Tableau 3). Dans le détail, les performances relatives sont moins bonnes en début de cycle puis s'améliorent lorsque la vitesse de croissance augmente.

	Blé tendre		Blé dur	
	Biomasse	Azote absorbé	Biomasse	Azote absorbé
Effectif	502	492	176	175
Biais	-0.1 tMS/ha	2 kgN/ha	-0.7 tMS/ha	-8 kgN/ha
RMSEP	2.0 tMS/ha	42 kgN/ha	2.0 tMS/ha	46 kgN/ha
Efficacité	0.83	0.72	0.80	0.69

Tableau 3 – Performances des modèles plante de CHN sur un jeu de données indépendant

Même si des améliorations sont toujours possibles, les performances de CHN pour estimer la croissance du blé tendre et du blé dur dans des contextes agroclimatiques variés sont satisfaisantes et permettent d'envisager d'utiliser ce modèle pour piloter en temps réel la fertilisation azotée.

Les performances du pilotage intégral de la fertilisation azotée avec l'approche « CHN-conduite »

Le pilotage intégral de la fertilisation azotée en temps réel avec le suivi de l'INN par CHN, et avec comme seul objectif le

« rendement », a conduit à des doses préconisées centrées sur l'optimum des courbes de réponse à l'azote. Pour cette modalité de pilotage, aucune différence moyenne de rendement n'a été mise en évidence par rapport à l'optimum des courbes de réponse. En revanche, le fractionnement globalement plus tardif sur ces modalités a eu comme conséquence une meilleure efficacité des apports d'azote minéral (Tableau 4). En effet le coefficient apparent d'utilisation (CAU) avec le pilotage de CHN est significativement supérieur de 7% à celui

de l'optimum des courbes de réponse.

Le pilotage calé sur un objectif « rendement et teneur en protéines » a permis d'atteindre en moyenne les objectifs fixés : 12.1% pour le blé tendre et 14.1% pour le blé dur. On constate logiquement une dose préconisée plus importante sur ces modalités, mais sans dégrader pour autant l'efficacité des apports : CAU également supérieur de 7% en comparaison à celui de l'optimum.

	Pilotage CHN « rendement »	Pilotage CHN « rendement et protéines »
Effectif (dont pour le CAU)	64 (51)	62 (44)
Dose N (kgN/ha)	+4.4 ^{NS}	+17 ^{***}
Rendement (q/ha à 15%H)	-0.5 ^{NS}	+0.5 ^{NS}
Teneur en protéines (%)	+0.3 ^{***}	+0.7 ^{***}
Azote absorbé p.a. (kgN/ha)	+8 ^{**}	+15 ^{***}
CAU (%)	+7 ^{**}	+7 [*]

Tableau 4 – Performances du pilotage avec CHN, en comparaison à l'optimum de la courbe de réponse (résultats 2017 et 2018). Test statistique en comparaison avec l'optimum calculé sur la courbe de réponse N : *** différence significative à 1% ; ** à 5% ; * à 10% ; NS différence non significative

Ces chiffres moyens cachent en réalité une grande diversité de situations (Figure 6). La campagne 2016-2017 a été marquée par de forts reliquats en sortie d'hiver et une sécheresse courant montaison. Les essais de cette première année d'essais présentaient en moyenne des doses préconisées inférieures de 33 kgN/ha à l'optimum et un CAU supérieur de 14%. La campagne 2017-2018 est plus contrastée. Sur certains essais, la dose préconisée a été supérieure à l'optimum de la courbe de réponse et le rendement dé plafonné. D'autres essais présentent des doses préconisées inférieures à l'optimum des courbes de réponse, tantôt avec des pertes de rendement, tantôt sans perte de rendement. même capacité à compenser une perte d'épis (Garcia, 2012).

D'après les premiers résultats, la trajectoire d'INN minimum demande à être redéfinie en début de cycle, car certains essais à haut potentiel ont subi de fortes carences courant tallage, se traduisant par des pertes de nombre d'épis importantes et des pertes de rendement significatives. En effet, tous les contextes pédoclimatiques ne peuvent pas tolérer le même niveau de carence azotée en début de cycle, notamment en lien avec le nombre d'épis minimum nécessaire pour atteindre le potentiel de rendement. L'effet variété sur la trajectoire d'INN minimum serait aussi intéressant à étudier, car toutes les variétés n'ont pas la

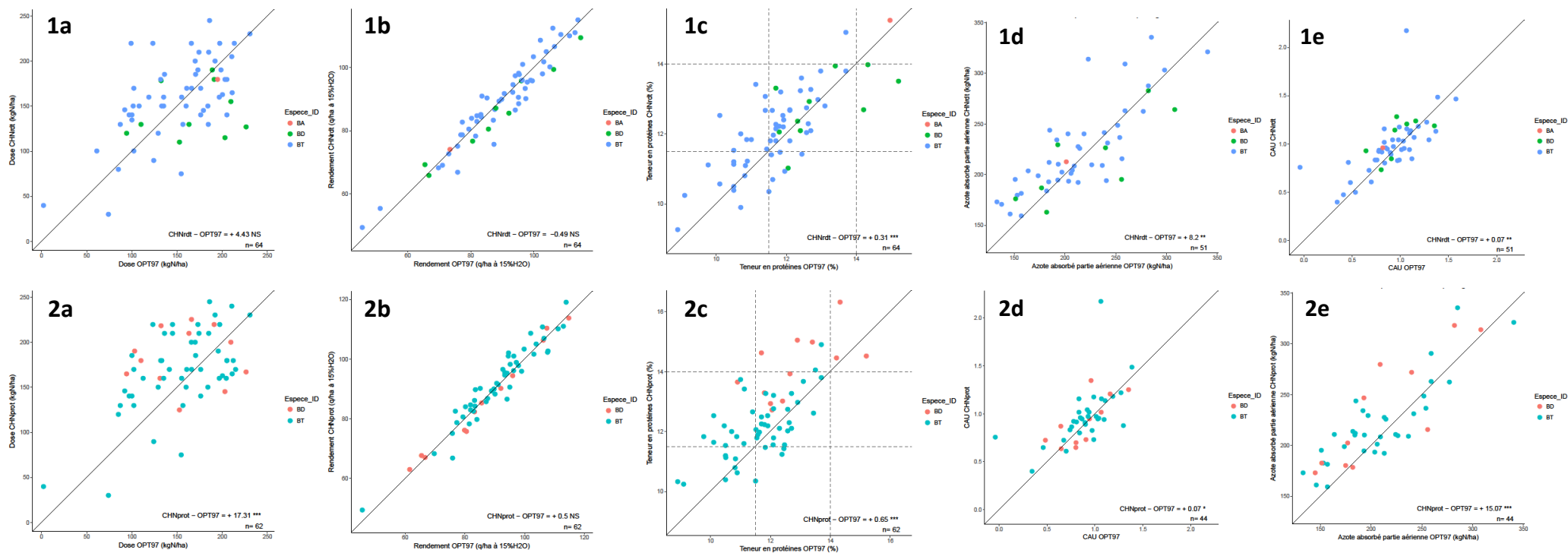


Figure 6 – Dose préconisée (-a), rendement (-b), teneur en protéines (-c), azote absorbé (-d) et CAU (-e) pour les modalités pilotage CHN rendement (1-) ou pilotage CHN rendement + protéines (2-) en comparaison à l'optimum a posteriori lu sur la courbe de réponse N des essais CHN-conduite 2016-2017 et 2017-2018.

Perspectives

Utilisation de l'assimilation de données

Il a été montré à plusieurs reprises que le couplage d'un modèle de culture avec des mesures réalisées de façon répétée dans le temps sur le terrain peut améliorer significativement la pertinence de ses prédictions (Naud et al., 2007 ; Dorigo et al., 2007 ; Huang et al., 2016).

Nous avons évalué les gains de performance de prédiction de la biomasse à floraison du modèle CHN, permis par l'assimilation de mesures de LAI sur maïs. CHN a été forcé à l'aide d'estimations quotidiennes de LAI sur la phase pré-floraison, obtenues avec un filtre de Kalman appliqué à un modèle de régression dynamique (DRMKF) (Wallach et al., 2014). Cette étude a été réalisée sur 80 traitements issus de la base de données maïs et disposant de mesures de LAI en phase de croissance et d'une mesure de biomasse à floraison. Le gain de prédiction permis par l'assimilation a été quantifié par l'indicateur suivant :

$$[E1] \text{ Gain} = |\text{résidu}| - |\text{résidu_DRMKF}|$$

Avec résidu = écart entre biomasse mesurée et simulée
résidu_DRMKF = écart entre biomasse mesurée et biomasse simulée après assimilation.

Le gain a été positif dans plus de 70% des situations simulées et est représenté individuellement dans la Figure 7 en fonction du résidu initial.

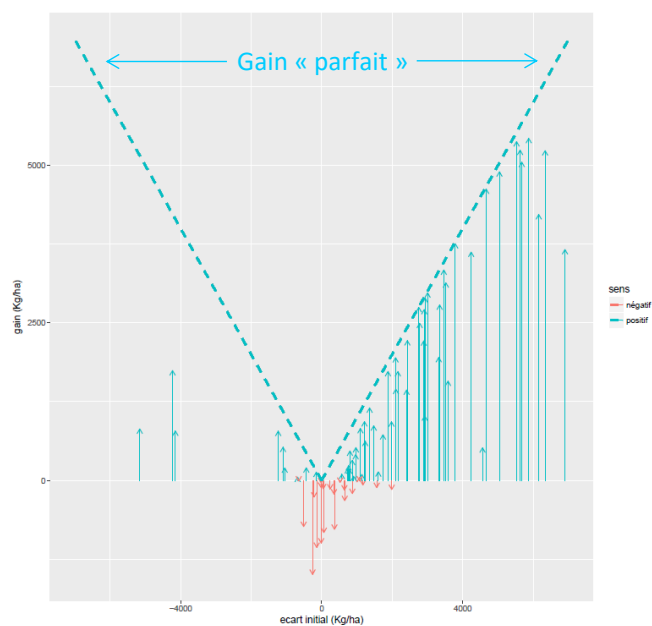


Figure 7 – Gain de performance de la biomasse floraison simulée avec CHN en assimilant des données de LAI pré-floraison en fonction de l'erreur initiale

Ces premiers résultats prometteurs confirment l'intérêt de valoriser les données capteurs de plus en plus nombreuses, via l'assimilation de données, afin d'améliorer les prédictions des modèles de culture tels que CHN.

Un travail mené également sur maïs a montré la nécessité d'assimiler conjointement le LAI avec une variable révélatrice de l'azote contenu dans les parties aériennes afin d'obtenir

un gain prédictif sur le statut azoté du couvert. Les capteurs de télédétection ou de proxy-détection ne permettent pas d'estimer directement une variable telle que le contenu en azote, mais un proxy comme la teneur en chlorophylle. L'assimilation de mesures de chlorophylle dans CHN nécessitera leur conversion préalable en azote absorbé. Il faudra aussi prendre garde à la conservation des masses (i.e. impacter les stocks du sol des recalages effectués sur la plante).

Conclusion

CHN-conduite est une approche innovante de pilotage de la fertilisation azotée sur blé tendre et sur blé dur. L'intérêt de pouvoir proposer à court terme aux producteurs de blé un pilotage « intégral » de la fertilisation azotée est multiple : (i) scientifique : poursuivre les travaux initiés avec la thèse de Clémence Ravier, afin de rendre l'approche plus robuste par une adaptation nécessaire aux contextes pédoclimatiques ; (ii) technique : optimiser les pratiques, en sécurisant les rendements (expression du potentiel de la culture quand le contexte est favorable), en assurant la qualité requise par les transformateurs en aval de la filière (11.5% de protéines pour le blé tendre et 14% de protéines le blé dur), mais également en limitant les pertes azotées par une meilleure efficacité des apports réalisés (CAU augmenté de +7% avec l'utilisation de l'approche CHN-conduite dans le réseau d'essais 2017 et 2018) ; (iii) environnemental et social : la meilleure efficacité des apports a pour conséquence de limiter les pertes d'azote dans les eaux et dans l'air ; (iv) et économique : optimiser la marge économique pour l'agriculteur.

Les modèles de culture occuperont à l'avenir une place de plus en plus importante dans la recherche (caractérisation des essais, diagnostic, simulation de données, ...) mais aussi dans le développement agricole, car ils permettent de piloter notamment les apports d'eau et d'azote en s'adaptant aux conditions pédoclimatiques en cours de campagne. L'apport des capteurs permettra dans un avenir proche de les valoriser encore à plus grande échelle grâce à des données à la fois plus fréquentes et plus précises (données d'entrée et de sortie des modèles). Ces possibilités numériques vont effectivement permettre de développer des outils de pilotage dynamique valorisant les modèles de fonctionnement des cultures, avec des applications à l'échelle intra-parcellaire.

Références bibliographiques

- Andriulo A., Mary B., Guéris J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the Rolling Pampas. *Agronomie*, vol.19, pp.365-377.
- Baret F., 1986. Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de doctorat, Université de Paris Sud - France.
- Bouthier A., Trochard R., Parnaudeau V., Nicolardot B., Morvan T., 2009. Valeur fertilisante azotée des produits résiduels organiques (PRO) : mieux prendre en compte la dynamique de la fourniture d'azote. Journées COMIFER et Académie d'Agriculture, Paris, 17 mars 2009.
- Burns I.G., 1976. Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *The Journal of Agricultural*

Science, vol.86/2, 305-313.

Cohan J.P., Laurent F., Lellahi A., 2011. *Fertiliser les cultures : concilier efficacité technique et défis environnementaux*. DEMETER, 2011, 269-327.

Cohan J.P., Soenen B., Le Souder C., Vericel G., Laurent F., 2018. Amélioration de la valorisation de l'azote chez le blé : progrès récents et perspectives. Colloque Phloème, Paris – France, 24 & 25 janvier 2018.

Comifer, 2013. Calcul de la fertilisation azotée – guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. COMIFER Edition 159 p.

Clivot H., Mary B., Valé M., Cohan J.P., Champolivier L., Piraux F., Laurent F., Justes E., 2017. Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, 44-59.

Dorigo W.A., Zurita-Milla R., De Wit A.J.W., Brazile J., Singh R., Schaepman M.E., 2007. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol9/2, 165-193.

Gate P., 2007. Les variétés de blé se comportent-elles de la même façon face à l'alimentation azotée ? *Perspectives Agricoles*, 332, 48-51.

Garcia C., 2012. Mise au point de nouvelles méthodologies de valorisation des données de composantes de rendement du blé tendre d'hiver. Mémoire de fin d'études, AgroSup Dijon – France.

Hébert J., 1969. La fumure azotée du blé. *Bulletin Technique d'Information* 244, 755-766.

Hénin S., 1980. Rapport du groupe de travail "Activités agricoles et qualité des eaux", Ministère de l'agriculture (1974-1988), Ministère de l'environnement et du cadre de vie. (Eds), 294.

Huang J., Sedano F., Huang Y., Ma H., Li X., Liang S., Tian L., Zhang X., Fan J., Wu W., 2016. Assimilating a Synthetic Kalman Filter Leaf Area Index Series into the WOFOST Model to Improve Regional Winter Wheat Yield Estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 188–202.

ITCF, 1978. La fertilisation azotée du blé. Institut Technique des Céréales et Fourrages.

Jeuffroy M.H., Bouchard C., 1999. Intensity and Duration of Nitrogen Deficiency on Wheat Grain Number. *Crop Sci.*, 39, 1385-1393.

Justes E., 1990. Contrôle de la nutrition azotée du blé par l'analyse de la teneur en nitrate dans la plante. *Perspectives Agricoles*, 145, 96-97.

Justes E., Mary B., Meynard J.M., Mchet J.M., Thelier-Huche L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany*, 74, 397–407.

Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non-mature residues. *Plant and Soil*, 325, 171-185.

Khaledian M.R., Mailhol J.C., Ruelle P., Rosique P., 2009. Adapting PILOTE Model for Water and Yield Management under Direct Seeding System: The Case of Corn and Durum Wheat in a Mediterranean Context. *Agricultural Water Management*, vol. 96/5, 757-770.

Laurent F., Kerveillant P., Besnard A., Vertés F., Mary B., Recous S., 2004. Effet de la destruction de prairies pâturées sur la minéralisation de l'azote : approche au champ et propositions de quantification. Synthèse de 7 dispositifs expérimentaux. ARVALIS-Institut du Végétal, 72 p.

Le Bris X., Gate P., Gouache D., Garcia C., Deswarte J.C., 2015. Préviation de la phénologie du blé tendre et utilisation dans des outils d'aide à la décision. Colloque francophone Phénologie 2015, Clermont-Ferrand – France, 17-19 Novembre 2015.

Lecoeur J., 2000. Présentation de l'avancement des travaux sur la modélisation du bilan hydrique chez le blé. Thèse de doctorat, ENSA de Montpellier - France.

Le Souder C., Guicherd C., Lorgeou J., Du Cheyron P., Bonnefoy M., Decarrier A., Cohan J.P., 2017. Efficience de l'azote et variétés de blé tendre : principaux enseignements d'un réseau de 3 années. Congrès GEMAS-COMIFER Nantes - France, 08 & 09 novembre 2017.

Mary B., Beaudouin N., Justes E., Mchet 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.

Monteith J.L., Moss C.J., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. In : *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*, vol.28/980, 277-294.

Naud C., Makowski D., Jeuffroy M.H., 2007. Application of an interacting particle filter to improve nitrogen nutrition index predictions for winter wheat. *Ecological Modeling*. 207, 251-263.

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*, vol.228/1, 83–103.

Ravier C., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use : the case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 224.

Ravier C., Jeuffroy M.H., Gate P., Cohan J.P., Meynard J.M., 2017a. Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*

Ravier C., Meynard J.M., Cohan J.P., Gate P., Jeuffroy M.H., 2017b. Early nitrogen deficiencies favor high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat. *European Journal of Agronomy*, 89, 16–24.

Savary S., Willocquet L., 2012. Chapter 7. *Crop Growth Modeling - Introducing GENECROP as a Framework*. In : *Simulation Modeling in Botanical Epidemiology and Crop Loss Analysis*.

Sinclair T.R., 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. *Field Crops Research*, 15, 125-141.

Soenen B., Le Bris X., Cohan J.P., Le Souder C., 2015. Premières valorisations agronomiques du modèle de culture « CHN ». Congrès GEMAS-COMIFER, Lyon - France, 18 & 19 novembre 2015.

Soenen B., Le Bris X., Laberdesque M., Cohan J.P., Laurent F., Bouthier A., Gouache D., Garcia C., 2016. CHN, a crop model to jointly manage water and nitrogen on winter wheat. International Crop Modelling Symposium, Berlin - Allemagne, 15-17 Mars 2016.

Soenen B., Closset M., Bonnard A., Le Bris X., 2017. *Validation of a new nitrogen management tool on winter wheat based on remote sensing diagnostic and agronomic prognosis: 'QN-method' – FARMSTAR*. Proceedings of 'Innovative Solutions for Sustainable Nitrogen Management', June 26-28 2017, Aarhus, Denmark

Wallach D., Makowski D., Jones J.W., Brun F., 2014. Data Assimilation for Dynamic Models. In : *Working with Dynamic Crop Models*, 311-43. Elsevier Eds.