

Agro-éco-Syst'N : Identification de systèmes agroécologiques à hautes performances azotées par le diagnostic avec l'outil Syst'N ®

Virginie Parnaudeau, Mathilde Heurtaux, Raymond Reau, Jean-François Vian, Chloé Le Gall, Aurélien Dupont, Pascal Dubrulle, Jérôme Duval, L. Lefèvre, Magali Bedu, et al.

▶ **To cite this version:**

Virginie Parnaudeau, Mathilde Heurtaux, Raymond Reau, Jean-François Vian, Chloé Le Gall, et al.. Agro-éco-Syst'N : Identification de systèmes agroécologiques à hautes performances azotées par le diagnostic avec l'outil Syst'N ®. Innovations Agronomiques, 2022, 85, pp.1-15. 10.17180/ciag-2022-vol85-art01 . hal-03691838

HAL Id: hal-03691838
https://isara.hal.science/hal-03691838

Submitted on 16 Jun 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Agro-éco-Syst'N - Identification de systèmes agroécologiques à hautes performances azotées par le diagnostic avec l'outil Syst'N®

Parnaudeau V.[1], Heurtaux M.[2], Reau R.[1], Vian J.-F.[3], Le Gall C.[4], Dupont A.[1], Dubrulle P.[1], Duval J.[1], Lefèvre L.[1], Bedu M.[1], Deneufbourg C.[5], Guézengar A.[6], Guillomo L.[7], Leclercq C.[8], Tauvel P.[9], Thirard M.[7], Célette F.[3], Gautier A.[5], Le Hir D.[6], Moreira M.[6], Perrineau R.[7], Schneider A.[4], Vaud E.[5], Gascoin F.[10], Pujol A.[11]

[1] INRAE – Unités du département AgroEcoSystem, France

[2] Acta-les instituts techniques agricoles – 149 rue de Bercy, F-75595 Paris Cedex 12

[3] Isara-Lyon – Agrapôle – 23 rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon Cedex 07

[4] Terres Inovia – 11 rue Monceau – CS 60003, F-75378 Paris Cedex 08

[5] CTIFL – 97 Bd Pereire, F-75017 Paris

[6] CRAB – rue Maurice Le Lannou – CS 74223, F-35042 Rennes Cedex

[7] EPLEFPA de Chartres-La Saussaye – La Saussaye, F-28630 Sours

[8] UniLaSalle – 19 rue Pierre Waguet – BP 30313, F-60026 Beauvais Cedex

[9] ITB – 45 rue de Naples, F-75008 Paris

[10] LPA La Ricarde – 1016 av. Jean Bouin, F-84800 L'Isle-sur-la-Sorgue

[11] LEGTA de Toulouse-Auzeville – BP 72647 – 2 route de Narbonne, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex

Correspondance : virginie.parnaudeau@inrae.fr

Résumé

Le projet Agro-éco-Syst'N visait à doter les conseillers agricoles, formateurs et enseignants de méthodes, outils et références leur permettant d'identifier et de concevoir des systèmes de culture à faibles pertes azotées vers l'environnement. A cette fin, une méthode de diagnostic des pertes d'azote vers l'eau (par lixiviation) et vers l'air (par volatilisation), utilisant l'outil Syst'N®, a été élaborée et formalisée. Elle a ensuite été utilisée pour évaluer et expliquer les performances azotées de plusieurs systèmes de culture dans des contextes pédoclimatiques variés. Quinze systèmes de culture ont ainsi été évalués et diagnostiqués. Leur analyse transversale a montré comment différentes combinaisons de pratiques dans un contexte donné conduisent à des performances variables en matière de pertes d'azote. Enfin, 21 cas-types ont été mis à disposition pour outiller les enseignants et conseillers sur le diagnostic des pertes d'azote, ressources mobilisables dans un éventail d'objectifs pédagogiques, de l'évaluation des pertes azotées à la reconception de systèmes de culture. Les systèmes simulés avec Syst'N® sont diffusés *via* la base de données Pertazote, mise à niveau au cours du projet.

Mots-clés : azote, systèmes de culture, lixiviation de nitrate, volatilisation d'ammoniac, pratiques culturales

Abstract : Agro-eco-Syst'N: Identifying high nitrogen performance agro-ecological systems with the Syst'N® tool

The Agro-eco-Syst'N project aimed at providing agricultural advisors and teachers with methods, tools and references to assist them in identifying and designing cropping systems with low nitrogen losses towards environment. To this end, a method was developed and formalized to assess nitrogen losses to air (through volatilization) and water (through leaching) using the Syst'N® tool. It was then used to evaluate and explain nitrogen losses of several cropping systems in various soil and climatic contexts. Fifteen systems were assessed accordingly. Their compared analysis showed how different combinations

of practices in given contexts lead to systems with unequal performance regarding nitrogen losses. Finally, 21 case studies are now available to teachers and advisors as tools to assess nitrogen losses. These resources can be used for a range of educational purposes, from the evaluation of nitrogen losses to the redesign of cropping systems. The Pertazote database, which was upgraded during the project, provides users with all the data collected and produced in this project.

Keywords: nitrogen, cropping systems, nitrate leaching, ammonia volatilization, cropping practices

Introduction

La révolution de l'agriculture du milieu du 20ème siècle a centré le pilotage des productions végétales sur l'utilisation des intrants, notamment des engrais. La production industrielle des engrais azotés a multiplié par deux la quantité d'azote réactif présent dans les systèmes (Erisman et al., 2007), ce qui a conduit à différents impacts négatifs pour l'homme et les écosystèmes (Galloway et al., 2003 ; Sutton et al., 2011). Les préoccupations de la société et du monde agricole vis-à-vis de la pollution de l'eau par les nitrates ont émergé dans les années 1980, mais force est de constater que l'amélioration de la qualité de l'eau n'est pas significative dans beaucoup de régions françaises au regard des normes de qualité chimique et écologique. Plus récemment, les risques pour la santé humaine et pour l'environnement relatifs aux émissions d'azote vers l'atmosphère ont été mis sur le devant de la scène. Outre leurs conséquences environnementales, ces pertes qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de kg/ha, constituent une perte économique pour l'agriculteur, soit qu'elles se traduisent par une perte de rendement, soit qu'il les compense par des apports.

Les pertes d'azote au champ posent donc des problèmes économiques et climatiques comme des problèmes environnementaux. Dans le projet Agro-éco-Syst'N, la haute performance azotée a été considérée sous l'angle des faibles pertes d'azote au champ, en se focalisant sur les pertes de nitrate et la qualité de l'eau (lixiviation) d'une part, et les pertes d'ammoniac dans l'air (volatilisation) d'une autre.

L'objectif final du projet était de mettre à la disposition des agriculteurs, de leurs conseillers et des gestionnaires des ressources (eau et air), une procédure opérationnelle de diagnostic se basant sur l'outil Syst'N®, permettant d'identifier et de faire connaître des systèmes de culture à hautes performances azotées (ou HPN), et de déterminer les pratiques à remettre en cause ou à encourager pour obtenir de faibles pertes d'azote. Les objectifs opérationnels étaient les suivants :

- Adapter l'outil Syst'N® à un éventail plus varié de cultures et le rendre plus fiable et opérationnel pour une gamme de systèmes agroécologiques,
- Formaliser une méthode de diagnostic des pertes d'azote (N) au champ, intégrant mieux les pertes gazeuses,
- Décrire dans leur diversité des systèmes de culture pratiqués (préalablement choisis) et leurs résultats en termes de production, d'alimentation azotée, et de pertes d'azote estimées avec Syst'N®
- Mettre à disposition les références obtenues sur les systèmes diagnostiqués dans le projet, et la procédure opérationnelle de diagnostic, auprès des acteurs impliqués dans la gestion de l'azote.

1. Evaluer et diagnostiquer les pertes d'azote dans les systèmes de culture

1.1 Méthode de diagnostic des pertes d'azote pour des systèmes à faibles pertes azotées

La maitrise des pertes d'azote nécessite en premier lieu une quantification de ces dernières. Mais pour identifier des pistes de solution, la compréhension des processus en jeu, ainsi que l'influence des facteurs

climatiques et édaphiques, et des pratiques culturales doivent être étudiées. Potentiellement, beaucoup de facteurs interagissent pour concourir aux pertes finalement observées. Néanmoins, certains de ses facteurs ont un poids plus important mais ces facteurs-clés varient en fonction de chaque situation considérée. Il est ainsi primordial de les identifier et de comprendre comment l'agriculteur peut agir afin d'aller vers des systèmes à faibles pertes. Dans ce but, une démarche opérationnelle de diagnostic des pertes d'azote pour le nitrate et l'ammoniac a été élaborée, permettant d'identifier pas à pas ces facteurs-clés et les leviers d'action.

1.1.1 Cadre conceptuel du diagnostic des pertes d'azote

Pour bâtir la démarche, un cadre conceptuel a d'abord été construit comme base du diagnostic. Des états clés ont été identifiés pour cela, ils sont déterminants pour expliquer les pertes d'azote et des pratiques clés qui déterminent les états clés. Une formalisation a été effectuée au travers de logigrammes mettant en lien ces différents facteurs-clés, comme le montre un exemple en Figure 1, et permettant d'avoir une vue synoptique des facteurs des pertes d'azote et de leurs interactions, y compris sur un pas de temps pluriannuel lorsque nécessaire.

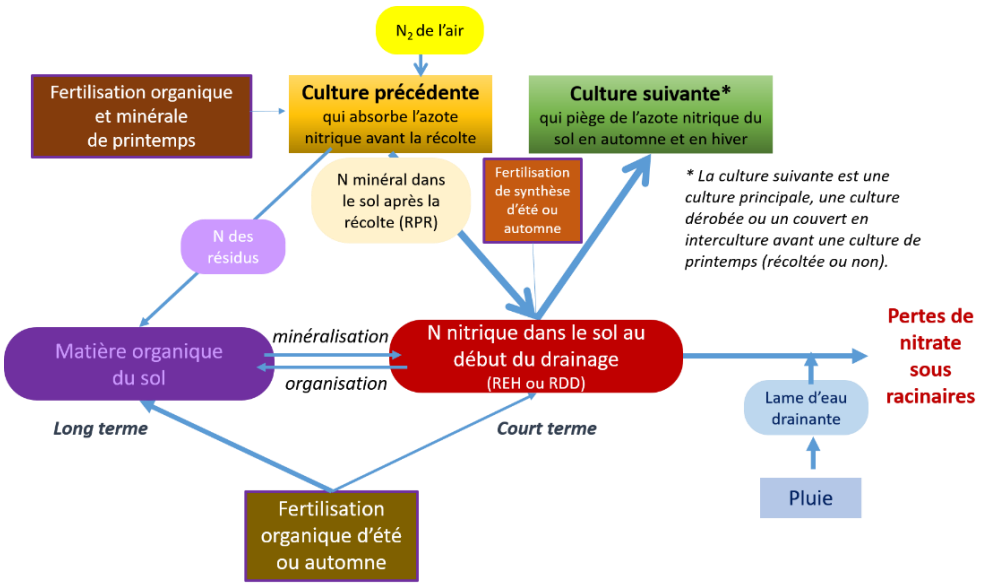


Figure 1 : Pratiques-clés et états-clés pour comprendre les pertes de nitrate en automne-hiver sous une culture annuelle

1.1.1.1 Facteurs clés et pertes d'ammoniac (NH_3)

Concernant les pertes de NH_3, l'état clé principal est la quantité d'ammonium en surface et son évolution après l'apport. Dans un contexte pédoclimatique donné, cette quantité dépend en premier lieu de la fertilisation réalisée, et en particulier de la forme d'engrais utilisée qui – à dose égale – peut faire varier du simple au triple la quantité d'ammonium présent en surface, soit l'azote potentiellement volatilisable (APV). Les pertes d'ammoniac sont des évènements fugaces, en lien direct avec la quantité d'ammonium présent à la surface du sol. Les deux clés pour avoir de faibles pertes par volatilisation sont (i) d'apporter une faible quantité d'azote potentiellement volatilisable ou (ii) de l'entrainer au-delà de 5 cm dans les jours suivant l'apport.

1.1.1.2 Facteurs clés et pertes de nitrate (NO_3^-)

Les pertes de nitrate sont quant à elles, la résultante de nombreuses interactions entre les pratiques clés, le climat et le sol du champ cultivé (Figure 2). Ces interactions sont différentes d'un système à l'autre, c'est pourquoi il est important d'analyser spécifiquement chaque situation (système de culture x contexte pédoclimatique et météorologique). Pour aboutir à une situation avec de faibles risques de pertes de

nitrate, l'état clé doit être caractérisé par une faible quantité d'azote nitrique disponible dans le sol avant tout épisode de drainage. Les voies pour y parvenir sont multiples, suivant que l'on mobilise des pratiques agissant à long, moyen ou/et court terme.

Ce modèle conceptuel de cause à effet reliant les facteurs clés et les pertes azotées a été utilisé pour structurer une démarche de diagnostic des pertes basée sur une analyse systémique des formes et flux d'azote dans le champ cultivé.

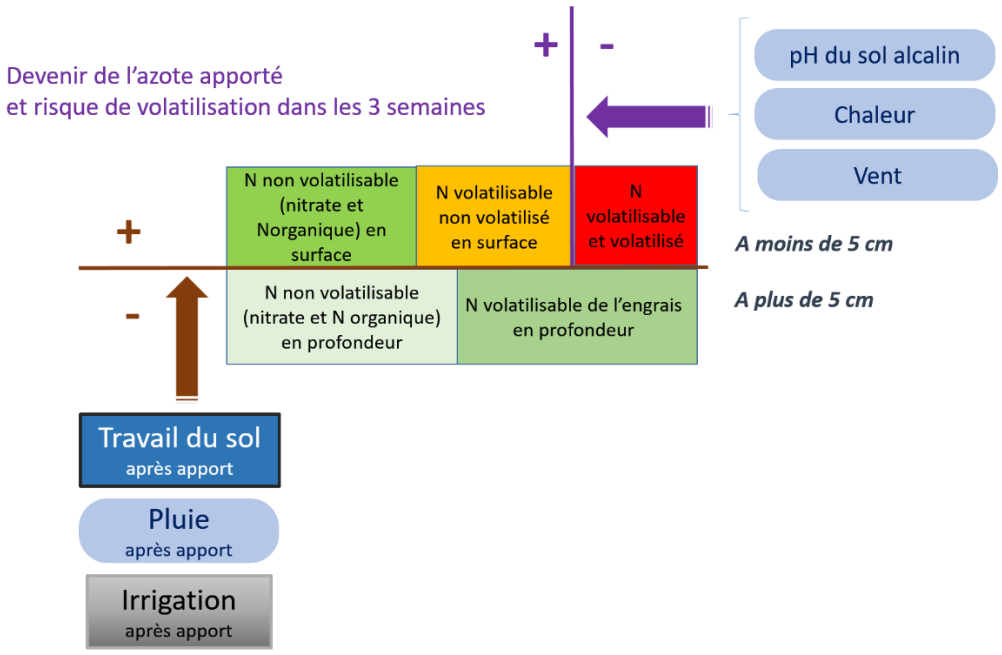


Figure 2 : Synthèse du diagnostic sur la période de 21 jours après chaque apport

1.1.2 Les étapes de la démarche de diagnostic

La première étape de la démarche est d'abord de décrire le champ cultivé, c'est-à-dire le système de culture dans son contexte, et de déterminer des objectifs en termes de pertes attendues. Il s'agit ensuite d'estimer les pertes sur l'ensemble de la rotation, d'identifier les périodes de « hot spot » (c'est-à-dire les pics d'émission), les états et pratiques clés conduisant – dans la situation étudiée – à ces pics d'émission et enfin de déterminer comment agir sur ces facteurs clés afin de reconcevoir des systèmes de culture à faibles pertes azotées. La démarche générale et ses étapes sont communes aux pertes de nitrate et d'ammoniac mais chaque étape fait l'objet d'une analyse spécifique pour chaque type de perte, s'appuyant sur les concepts précédemment développés. Les 8 étapes sont les suivantes : 1/ définir le résultat attendu pour la situation considérée, 2/ estimer les pertes, 3/ analyser la dynamique temporelle des pertes, 4/ comparer le niveau de pertes moyen de la rotation au résultat attendu, 5/ identifier les « hotspots » des pertes, 6/ comprendre les déterminants de chaque « hotspot », 7/ faire la synthèse pluriannuelle à l'échelle de la rotation, 8/ identifier des pistes pour atteindre de faibles pertes.

Cette démarche a été construite pour être mise en œuvre avec des agriculteurs ou encore des étudiants[1]. Elle a été pensée pour s'appuyer sur l'outil Syst'N, notamment pour la quantification puis l'analyse des déterminants des pertes, mais elle peut aussi être mise en œuvre de manière indépendante.

La démarche de diagnostic a été mise en œuvre avec Syst'N sur plusieurs lieux dont la ferme expérimentale du Lycée de la Saussaye (Figure 3). Le système appelé « autonome » est d'abord décrit

[1] Guide de diagnostic des pertes d'azote:
http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=146

dans son contexte et une première simulation de cette situation réelle où il existe des mesures de N minéral dans le sol (reliquat) est réalisée pour calibrer le modèle. La simulation des systèmes existants sur une année à potentiel de lessivage élevé répétée tous les ans a permis l'estimation des pertes d'azote maximales et l'identification des déterminants des pertes azotées. Des systèmes modifiés ont ensuite été imaginés puis simulés, diagnostiques, améliorés jusqu'à atteindre des systèmes faiblement émetteurs (démarche de boucle de progrès).

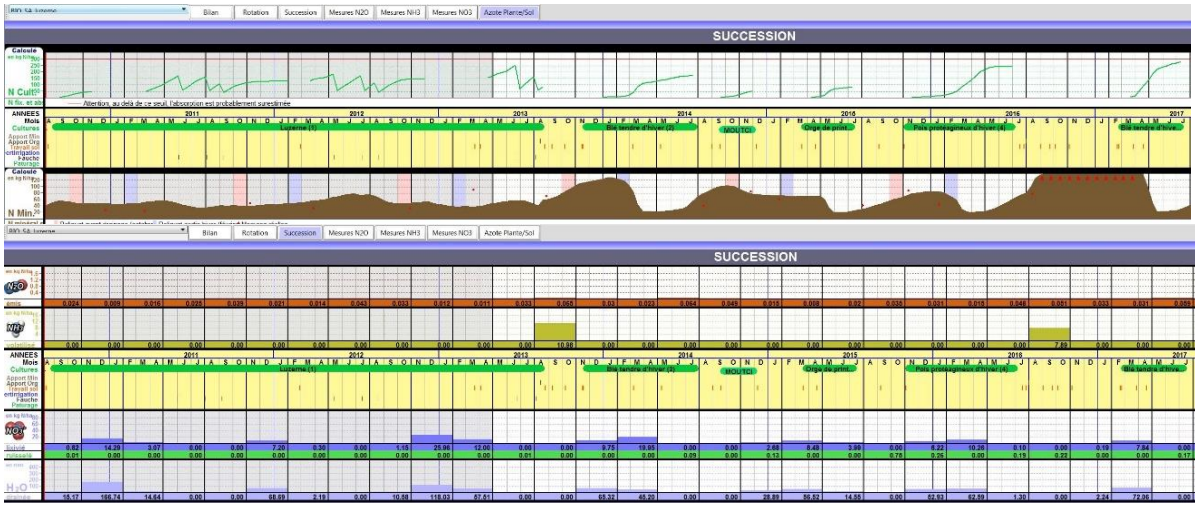


Figure 3 : Illustration des étapes de calibration, d'estimation et d'analyse de la dynamique temporelle des pertes réalisée avec Syst'N la ferme expérimentale du Lycée de la Saussaye

1.2 L'outil Syst'N® : adaptation à des systèmes diversifiés

L'outil logiciel Syst'N® (Parnaudeau et al., 2012) vise à estimer et à faciliter le diagnostic des pertes d'azote dans les systèmes de culture, et *in fine* à mieux gérer l'azote dans les territoires agricoles. Intégrant un modèle de culture, il quantifie les pertes d'azote sous différentes formes : le nitrate (NO_3^-) vers les eaux, l'ammoniac (NH_3) et le protoxyde d'azote (N_2O) vers l'atmosphère, pour une large gamme de cultures, au cours de la succession culturale, en fonction des itinéraires techniques pratiqués, selon les sols et les climats métropolitains. Il a été initialement co-conçu par l'INRA et les instituts techniques agricoles dans le cadre du Réseau Mixte Technologique (RMT) Fertilisation & Environnement, en partenariat avec ses utilisateurs finaux qui sont prioritairement les agents du développement agricole, les conseillers agricoles et les agences environnementales. A la partie logicielle simulant les pertes d'azote (appelé « simulateur » par la suite) est associée la base de données Pertazote, non encore diffusée, qui met à disposition à des tiers des résultats de simulation consolidés ou des résultats de mesures de pertes N dans les systèmes de culture.

1.2.1 Simulateur

Un recensement des cultures à prendre en compte dans l'outil avait été réalisé lors de la construction du projet. Pendant le projet, pour chacune de ces cultures, l'adéquation a d'abord été analysée entre ce qui était déjà implémenté dans le modèle et la culture en question, en termes de pratiques culturales et de processus physiologiques des cultures relatifs au cycle de l'azote. Pour certaines cultures, il s'agit alors « simplement » d'adapter les valeurs de paramètres existants dans les formalismes du modèle de Syst'N ; pour d'autres, il est nécessaire de modifier les formalismes (ex. ajout d'une phase de dormance) voire les interfaces de l'outil (ex. ajout d'un champ pour les densités de semis).

Une fois cette analyse réalisée, l'adaptation de Syst'N à de nouvelles cultures commence par une revue bibliographique des modèles proches de Syst'N prenant en compte ce type de cultures et de recherche des valeurs de paramètres physiologiques des cultures. A noter, que comme cela a prévalu dès l'origine

du modèle, les formalismes à implémenter sont sélectionnés selon le principe de parcimonie et la facilité d'accès aux données d'entrée pour les utilisateurs (Parnaudeau et al., 2012).

Les données mesurées ont également été recensées pour les différentes cultures existantes chez les différents partenaires, voire au-delà, nécessaires au paramétrage de nouvelles cultures dans Syst'N (Tableau 1). A ce stade, il s'est avéré que certaines cultures pour lesquelles n'existaient pas les données nécessaires à la modélisation ne pourraient pas être prises en compte, telles que la phacélie et le trèfle.

Tableau 1 : Source des données relatives aux différentes cultures

Cultures	**Origine des données**
Chanvre, lin oléagineux	AgroTransfert RT, Arvalis, CRAB, ISARA, INRAE
Carottes	CTIFL
Pomme de terre	Arvalis, AgroTransfert RT
Soja et féverole	INRAE, Terres Inovia
Luzerne	INRAE
Blé-pois	ESA, INRAE

Une fois ces étapes préalables effectuées, l'adaptation se déroule en plusieurs étapes (Figure 4). La mise en œuvre de cette démarche nécessite une étroite collaboration entre agronomes et informaticiens.

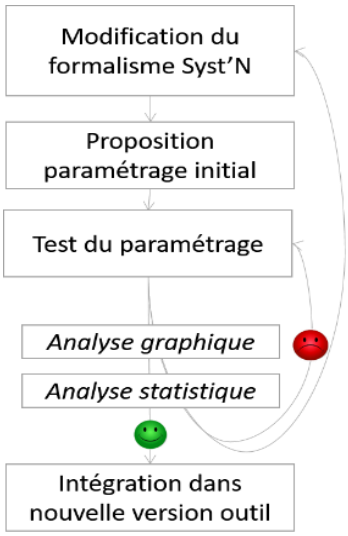


Figure 4 : Démarche décrivant l'implémentation de nouvelles cultures dans Syst'N.

Les cultures implémentées dans l'outil au cours du projet, parfois grâce à une mutualisation avec les travaux réalisés dans le projet EcoSystN financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) (identifiées par *), sont les suivantes :

- Cultures de diversification : chanvre, lin oléagineux et sarrasin.
- Cultures légumières : carotte et pomme de terre*. Ces cultures racines ou à tubercule ont été paramétrées à partir du formalisme préexistant dans Syst'N pour la betterave.
- Cultures légumineuses : luzerne*, soja et féverole. Les légumineuses annuelles (pois, soja, féverole) et pérennes (luzerne) ont nécessité l'implémentation de nouveaux formalismes issus ou inspirés de modèles existants : celui de la fixation symbiotique issu du modèle STICS (Corre-Hellou et al., 2007 ; Brisson et al., 2009) qui permet de simuler ce processus de façon

satisfaisante et celui de la dormance pour la luzerne, inspiré du modèle CropSyst (Confalonieri et Bechini, 2004).

- Cultures associées céréales-légumineuses : blé-pois. Cette implémentation a été réalisée à partir des travaux déjà initiés par Hannebert (2015) qui s'inspirait du modèle Azodyn-IC (Naudin et al., 2009).

D'autres améliorations ont été apportées à Syst'N au cours du projet permettant des résultats de simulation plus fiables. L'une d'elle est la possibilité (facultative) de saisie d'une date de floraison ou d'épiaison qui permet un calcul plus juste d'autres stades de développement. Par ailleurs la simulation du stress hydrique a été modifiée (remplacée en partie par le calcul du modèle STICS), ainsi que celle de la croissance : arrêt de la croissance des racines (et donc du besoin d'azote par les racines) et décroissance du RUE (*radiation use efficiency*) à partir du stade « début de remplissage des grains » (DRG). Enfin le modèle simulant la minéralisation de l'azote du sol a été modifié (remplacé par le modèle proposé par Clivot et al., 2017).

1.2.2 Interfaces

Depuis la première version du logiciel, Syst'N® fonctionne en mode client-serveur. Les utilisateurs installent sur leur ordinateur les interfaces d'entrée (saisie de données) et de sortie (visualisation des résultats). Le simulateur, installé sur un serveur distant, est interrogé lors du lancement de la simulation par l'utilisateur, et les résultats lui sont envoyés en retour. Afin de rendre plus évolutives les interfaces, et, dans le cadre du projet, de les adapter à la prise en compte des cultures associées, des interfaces web ont été conçues. Elles ont été développées autour d'outils utilisant le langage javascript aussi bien côté client (navigateur) que côté serveur (serveur de pages et API - interface de programmation d'application): Node, Nuxt (implémentant express, Vue, Vuex). Vue et Vuex, via javascript exécuté en local par le navigateur, permettent des interfaces avec une forte réactivité proche des applications standalone et de conserver ou améliorer l'ergonomie des anciennes interfaces client-serveur.

Une des nouvelles fonctionnalités de cette version web, utile pour le diagnostic, a émergé de l'utilisation de la version client-serveur par les partenaires du projet : la possibilité de visualiser simultanément les résultats des différentes pertes d'azote, et de la dynamique de l'azote dans le système sol-plante (Figure 5). Ces interfaces ont d'abord été testées par quelques utilisateurs de Syst'N et leurs retours ont été mobilisés pour améliorer les interfaces.



Figure 5 : Visualisation des résultats via la nouvelle interface web 2.0

2. Des systèmes à haute performance azotée (HPN)

2.1 Définition des systèmes HPN

Les objectifs en termes de pertes étant variables d'un territoire à un autre du fait de contextes et d'enjeux différents, des seuils communs ont été choisis dans le cadre du projet afin d'évaluer l'atteinte ou non d'une haute performance azotée concernant les pertes par lixiviation et par volatilisation. Ces seuils sont exprimés en valeurs relatives : en fonction de la lame drainante pour le nitrate lixivié et en fonction de la dose moyenne d'azote exogène apportée. Les seuils sont les suivants :

- Lixiviation de nitrate : moins de 5 kg N/ha/an pour 100 mm d'eau drainée
- Volatilisation : moins de 5% de l'apport d'azote moyen annuel

La haute performance azotée repose sur de faibles pertes de nitrate et d'ammoniac globalement en moyenne annuelle du système de culture. Une situation est considérée comme très performante pour le nitrate si l'on obtient en moyenne moins de 5 kg N/ha/an de lixiviation de nitrate ; entre 5 et 10 kg N/ha/an, elle est considérée comme performante ; sinon elle est non performante. Une situation est considérée comme très performante pour l'ammoniac si l'on obtient en moyenne moins de 5 % de volatilisation des apports réalisés ; entre 5 et 10 %, elle est considérée comme performante ; sinon elle est non performante. Le Tableau 2 permet de qualifier la « double performance azotée » d'une situation donnée : la performance sur le nitrate ET l'ammoniac, agrégées suivant une table de contingence.

Tableau 2 : Table de contingence présentant les seuils choisis dans le projet pour la double performance azotée

Seuils de pertes	Volatilisation d'ammoniac < 5 % des apports (kgN pour100 kg N apporté)	Volatilisation d'ammoniac 5 à 10 % des apports (kgN pour100 kg N apporté)	Volatilisation d'ammoniac > 10 % des apports (kgN pour100 kg N apporté)
Lixiviation du nitrate < 5 kgN / 100 mm de lame drainante	**Haute performance azotée (HPN)**	**Haute performance azotée (HPN)**	Performance azotée partielle
Lixiviation du nitrate 5 à 10 kgN / 100 mm de lame drainante	**Haute performance azotée (HPN)**	Performance azotée partielle	Basse performance azotée
Lixiviation du nitrate > 10 kgN / 100 mm de lame drainante	Performance azotée partielle	Basse performance azotée	Basse performance azotée

2.2 Les systèmes de culture étudiés dans leur contexte

Les 15 systèmes étudiés dans cette partie du projet sont issus de 6 différents sites expérimentaux répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les systèmes étudiés correspondent à des systèmes de polyculture (céréales, protéagineux et légumineuses, fourrage, betterave), à l'exception du nord Finistère où ont été évalués des systèmes légumiers à base de chou-fleur. Les 6 sites présentent une variabilité climatique (du climat océanique au continental à influence méditerranéenne) avec, entre autres caractéristiques, une pluviométrie moyenne annuelle allant de 600 à 1000 mm. Les sols sont également variés mais bien souvent relativement profonds (plus de 90 cm) sauf dans le Berry où le sol argilo-calcaire superficiel a une profondeur de 40 à 60 cm. Dans ces 15 situations, nous avons estimé les pertes d'azote au cours des rotations par des simulations avec l'outil Syst'N calibrées le plus souvent avec des mesures d'azote minéral dans le sol. Les résultats ont ensuite fait l'objet d'une analyse transversale au regard des performances azotées des différents systèmes.

2.3 Résultats des évaluations et diagnostics

La haute performance en termes de pertes d'ammoniac (volatilisation de moins de 5 % des apports) a été atteinte dans 12 systèmes issus de 5 sites différents, tandis que la performance en termes de pertes de nitrate (lixiviation entre 5 et 10 kg N pour 100 mm drainés) est atteinte dans seulement 3 systèmes de culture issus de 3 sites différents (Tableau 3). Il faut noter que les cas étudiés ne visent pas à l'origine de faibles pertes d'azote mais d'autres critères : faible usage des pesticides, autonomie azotée, etc.

En exemple d'un système performant sur le critère Nitrate, le système de culture de Champagne crayeuse de « référence » peut être cité (Figure 6). Le système du dispositif SYPPRE en Champagne crayeuse est performant en termes de pertes de nitrate pour le système à « rotation courte » : elles sont de 9.5 kg N/100mm drainé, soit une perte totale de 10 kg N/ha/an, mais 12 % des apports d'azote (18 kg N/ha/an) se volatilisent. Le schéma ci-dessous, construit à partir des variables issues des simulations Syst'N, a permis une analyse de l'origine de la performance Nitrate.

Sur le même site, nous avons étudié la performance du système « innovant » SYPPRE qui s'avère décevante pour le nitrate (Figure 7). En effet, la présence accrue de légumineuses (2 années de production de pois et présence dans les cultures intermédiaires) développe la minéralisation sans que les couverts soient capables d'absorber ce supplément d'azote. Cela conduit à un fort niveau de reliquat et à des pertes de 14 kg N / 100 mm. L'absence de légumineuse semble ici une clé de la performance nitrate du système « témoin » à rotation courte. En leur présence, il semble indispensable d'accroitre le piégeage d'azote en été et automne au-delà de 40 unités/an en moyenne.

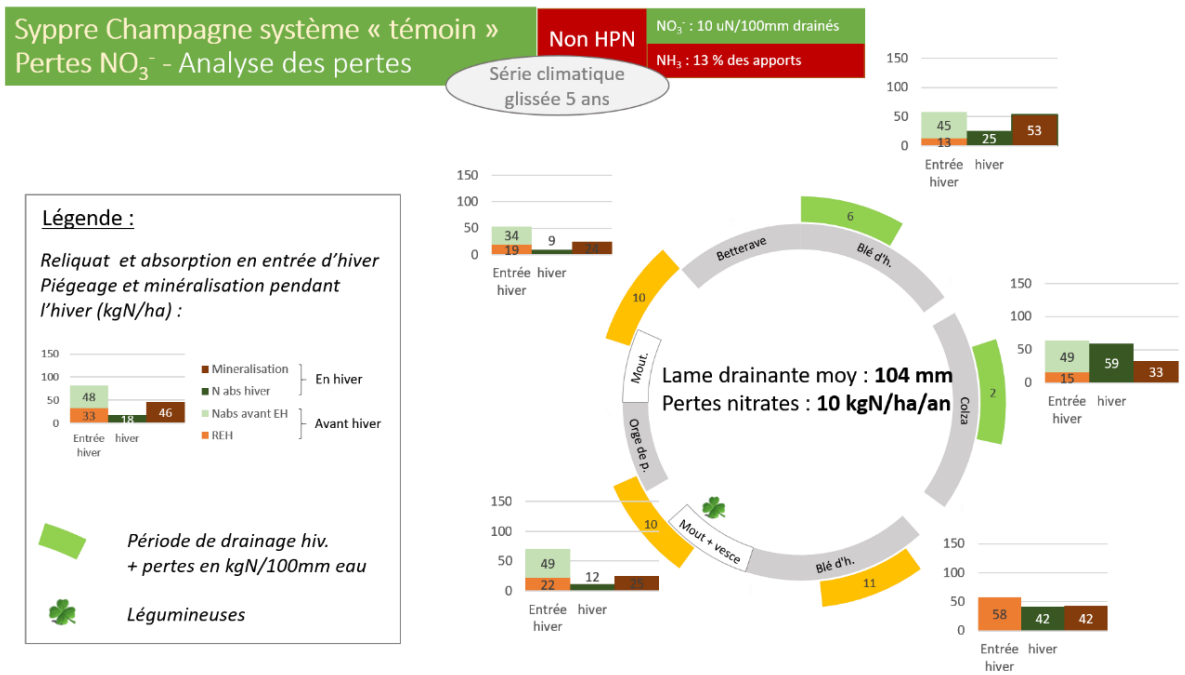


Figure 6 : Système du dispositif SYPPRE en Champagne crayeuse

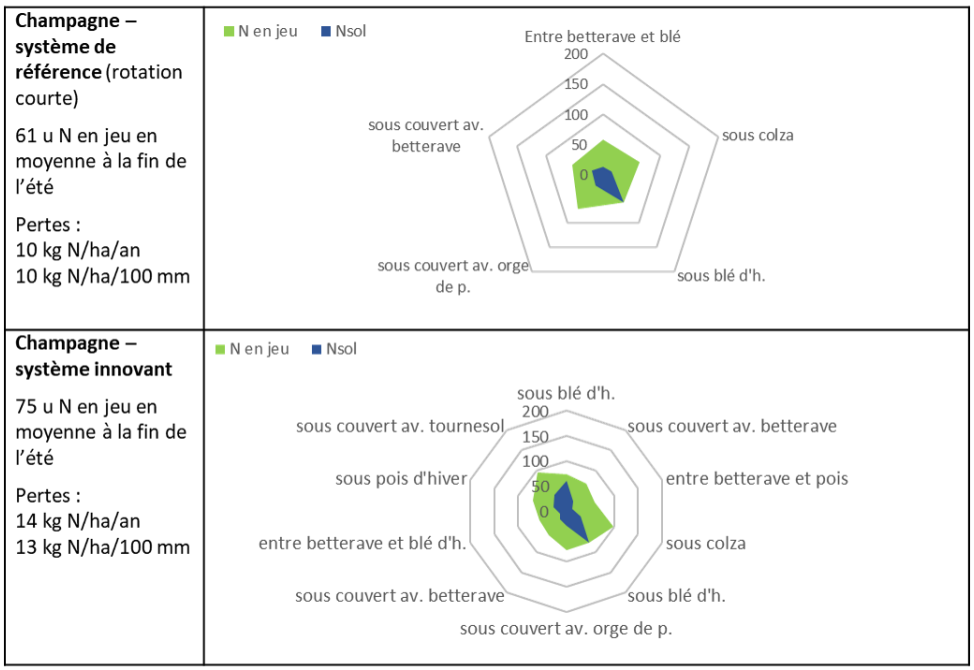


Figure 7 : Etude de la performance du système du dispositif SYPPRE en Champagne crayeuse. (N sol = N minéral présent dans le sol avant la période de drainage ; N en jeu = N présent dans les cultures + N minéral du sol)

2.4 Déterminants de la haute performance azotée dans les systèmes étudiés

Dans les sols acides ou peu basiques, la performance en volatilisation a le plus souvent été obtenue via le choix de formes d'engrais de synthèse riches en nitrate (ammonitrate, nitrate de chaux, sulfonitrate), ce qui n'a pas suffi dans les sols crayeux de Champagne avec un pH élevé. Les situations performantes quant aux pertes de nitrate ont comme point commun de faibles reliquats d'azote minéral à l'entrée de l'hiver : 32, 27 et 25 kg N/ha en moyenne de la rotation (Figure 8). Ce résultat a été obtenu généralement par un piégeage de nitrate en été et automne, en interculture courte comme en interculture longue. Ce piégeage s'avère essentiel dès lors qu'il y a des apports d'azote organique ou de synthèse en été et automne, une forte minéralisation de l'azote ou des fertilisations azotées de printemps qui ne sont pas valorisées.

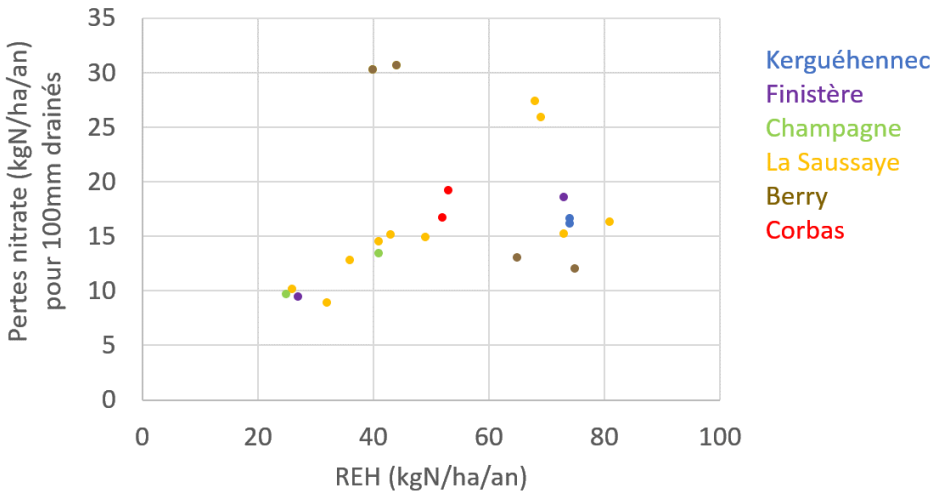


Figure 8 : Pertes de nitrate pour 100 mm d'eau drainée en fonction du reliquat en entrée d'hiver (REH) simulé dans différents sites. Les simulations réalisées avec une série pluviométrique très sèche de La Saussaye ne figurent pas ici.

3. Appropriation de ces démarches et mise en pratique

3.1 Des cas-types comme ressources pédagogiques

Le projet Agro-éco-Syst'N a contribué à identifier les systèmes de culture et les combinaisons de pratiques susceptibles d'émettre peu d'azote vers l'environnement. Ce projet a également permis d'élaborer, tester et diffuser des ressources pour l'enseignement agricole, le conseil et l'animation de groupes d'agriculteur.rice.s. Ces ressources, nommées « cas-types », décrivent un système de culture dans un contexte pédoclimatique et météorologique donné et ses performances azotées. Les performances azotées d'un système de culture sont qualifiées ici au regard de leurs pertes d'azote dans l'environnement par lixiviation du nitrate et par volatilisation d'ammoniac. Afin de permettre aux formateurs et animateurs de trouver un ou plusieurs cas-types proches des situations locales susceptibles d'intéresser leur public, 21 cas-types ont été élaborés à ce jour[2] (Tableau 3) dans différentes régions françaises (Berry, Bretagne, Beauce, Champagne, Landes, Lauragais, Picardie, Rhône-Alpes) pour des systèmes de culture couramment rencontrés ou expérimentés dans ces régions (systèmes céréaliers spécialisés, polyculture-élevage, légumiers, AB…).

Ces « cas-types » sont conçus et mis à disposition des formateurs et animateurs de groupes de professionnel.le.s pour leur permettre d'élaborer des ressources pédagogiques visant, selon leurs publics et objectifs pédagogiques, à :

- Comprendre les dynamiques de fourniture de l'azote minéral.
- Evaluer (quantifier) les pertes d'azote et sensibiliser les apprenant.es aux risques environnementaux de la gestion de l'azote en agriculture.
- Réaliser un diagnostic des pertes d'azote.
- Concevoir des systèmes de culture à faibles pertes d'azote.

Ainsi, selon les objectifs pédagogiques visés et le public, ces cas-types peuvent permettre aux apprenant.es de connaître les différentes formes de l'azote et leurs importances relatives à l'échelle d'un système de culture (N venant de la fixation atmosphérique, N issu de la minéralisation des matières organiques, N provenant des engrais minéraux…) et de savoir repérer la synchronisation ou désynchronisation entre la disponibilité de l'azote minéral dans le sol et les prélèvements par les cultures. Par ailleurs, ces ressources permettent d'appréhender les principales voies de pertes de l'azote dans un contexte donné (volatilisation / lixiviation), leur importance relative et les principales périodes de pertes d'azote. Enfin, ces ressources peuvent servir de support pour que les apprenant.es et les professionnels mettent en œuvre la démarche de diagnostic des pertes d'azote, visant à comprendre l'origine des pertes (reliquats post-récolte, début drainage, effet précédent, présence d'un couvert végétal d'interculture, forme des apports d'azote…) en mettant en relation les formes et volumes des pertes avec l'itinéraire technique, le climat et le type de sol afin de proposer des pistes pour la réduction de ces pertes.

Chaque cas-type précise le contexte, non seulement pédoclimatique, technique et agronomique, mais aussi règlementaire, afin d'expliquer les choix techniques effectués sur toute la durée de la succession culturale et leurs conséquences sur les performances du système de culture en termes de pertes d'azote par lixiviation et volatilisation. Il peut être utilisé par les formateurs ou conseillers en entier ou en partie (extraction de figures, tableaux, données quantitatives) selon les objectifs pédagogiques qu'ils poursuivent.

[2] Ces 21 cas-types incluent les 15 systèmes étudiés en § 2.

Tableau 3 : Liste des cas-types

N°	Intitulé du cas-type	Type de sol	Pratiqué ou prototype	Organisme
BR1	Système céréalier en élevage de volailles en Bretagne	Limon sablo-argileux	Pratiqué	CRAB
BR2	Système céréalier en élevage de porcs sur caillebotis et paille en Bretagne	Limon sablo-argileux	Pratiqué	CRAB
BR3	Système céréalier en élevage de porcs sur paille en Bretagne	Limon sablo-argileux	Pratiqué	CRAB
BR4	Système céréalier en élevage de porcs sur caillebotis en Bretagne	Limon sablo-argileux	Pratiqué	CRAB
CF1	Système légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne	Sable limoneux	Prototype	CRAB
CF2	Système légumier de monoculture de chou-fleur en Bretagne avec leviers de réduction des pertes azotées	Limon	Prototype	CRAB
CA1	Système de culture de carotte en Aquitaine	Sableux	Prototype	CTIFL
CB1	Systèmes céréaliers en Champagne berrichonne : système de référence (colza-blé-blé-tournesol-blé) sur limon sableux profonds	Limons sableux profonds	Pratiqué	Terres Inovia
CH1	Système céréalier en craie de Champagne : système de référence	Calcosol	Pratiqué	ITB
CH2	Système céréalier en craie de Champagne : système innovant	Calcosol	Pratiqué	ITB
CVL1	Système céréalier raisonné non irrigué en région Centre-Val-de-Loire (Beauce)	Limon argileux profond sur calcaire	Pratiqué	Ferme de la Saussaye
CVL2	Système céréalier sans élevage conduit en agriculture biologique, non irrigué, en région Centre-Val de Loire (Beauce)	Limon argileux moyennement profond à profond sur calcaire de Beauce	Pratiqué	Ferme de la Saussaye
PI1	Rotation courte sur sol superficiel en Picardie	Cranette sur craie	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI2	Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur limon en Picardie	Limon battant moyennement profond	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI3	Rotation maïs grain-blé-colza-blé sur limon battant en Picardie	Limon battant moyennement profond	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI4	Rotation maïs ensilage/ blé/pois de printemps/ colza/ blé sur limon en Picardie	Limon battant moyennement profond	Prototype	UniLaSalle Beauvais
PI5	Rotation betterave/ blé/ colza/ blé sur limon en Picardie	Limon battant moyennement profond	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI6	Rotation maïs ensilage-blé-colza-blé sur argile à silex en Picardie	Argile à silex	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
PI7	Rotation sur limon argileux à silex en Picardie	Limon argileux à silex sur argile à silex	Pratiqué	UniLaSalle Beauvais
RA1	Système céréalier sans élevage conduit en Agriculture Biologique (AB) en Rhône-Alpes : système de référence	Limono-argilo-sableux	Pratiqué	Isara
RA2	Système céréalier sans élevage conduit en Agriculture Biologique (AB) en Rhône-Alpes : système innovant	Limono-argilo-sableux	Pratiqué	Isara

CRAB : Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne ; ITB : Institut Technique de la Betterave ; CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes.

Les cas-types produits en cours de projet ont été utilisés comme supports pédagogiques auprès d'étudiant.es en Bac Pro, BTS et écoles d'ingénieurs. Par exemple en Bac Pro l'objectif était de mieux faire comprendre les dynamiques de fourniture de l'azote minéral et de repérer les périodes de synchronisation entre la fourniture en azote minéral du sol et les besoins des cultures en place. Pour cela, les figures des dynamiques d'azote sol-plante-atmosphère ont été extraites des cas-types et le formateur a ajouté des bulles de texte que les étudiant.es devaient compléter. La Figure 9 donne un exemple de rendu afin de faire passer ces notions de dynamiques de l'azote minéral et de synchronisation entre fournitures du sol et besoins des plantes.

Selon le public visé, l'accompagnement des apprenant.es pour l'interprétation de ces sorties (Figure 9) est plus ou moins importante mais ces sorties sont très utiles pour faire comprendre les dynamiques pluriannuelles de fournitures par le sol, absorption par les cultures et pertes d'azote par lixiviation notamment.

Les cas-types ont également été utilisés dans les formations ingénieurs lors de TD ou de travaux de groupes. Seule la 1ère partie des cas-types a été distribuée aux élèves : contexte pédoclimatique, description du système de culture, objectifs attendus et paramètres retenus pour la modélisation sous Syst'N®. Les étudiant.es ont à disposition toutes les sorties graphiques et les tableaux présents dans le cas-type. L'objectif pour eux est alors de mettre en œuvre la démarche de diagnostic présentée précédemment. En guise de correction, les étudiant.es pouvaient à la fin de l'exercice comparer leur production à l'analyse faite par la personne qui a rédigé le cas-type.

Au-delà de l'utilisation des cas-types, l'outil Syst'N® a été utilisé par des conseiller.es agricoles. A partir des données d'exploitations agricoles qu'ils suivent ils ont présenté les résultats des simulations réalisées avec Syst'N®. Cette démarche a permis de quantifier les l'azote en jeu à l'échelle du système de culture, les périodes de pertes préférentielles en azote et d'élaborer des pistes de progrès avec l'agriculteur. Ce travail a conduit à des améliorations notables en terme de gestion de l'azote sur quelques exploitations mais reste chronophage pour les conseillers (acquisition des données d'entrée, simulations, présentation des résultats etc.). Cependant, cette démarche pourrait être entreprise à l'échelle de groupes d'agriculteurs en présentant un ou des cas-types proches des contextes locaux d'exploitation ou en élaborant un cas-type représentatif des systèmes rencontrés sur un territoire. La discussion en groupe de recherche de voies de réduction des pertes ouvrirait certainement d'autres voies que celles explorées individuellement.

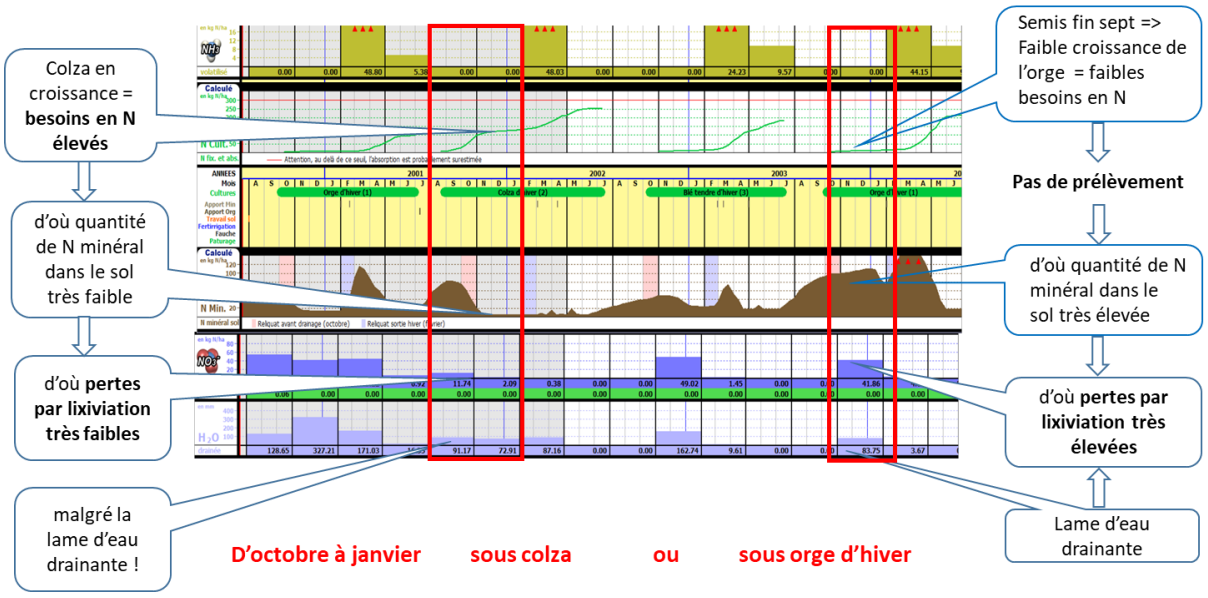


Figure 9 : Dynamiques pluriannuelles de l'azote dans une rotation colza-blé-orge (Source : C. Leclerq, UniLaSalle).

Ces cas-types sont donc une boite à outils pour les formateurs. Ils peuvent, on l'espère, trouver des cas-types qui se rapprochent de leur contexte agricole, extraire des figures ou tableaux et certaines parties du texte afin d'en faire des exercices, des TD ou des supports de cours pour atteindre un des objectifs pédagogiques cités. Le public peut être large allant des étudiant.es en filière pro aux agriculteurs. Afin d'aider les formateurs, nous avons également conçu un guide d'utilisation des cas-types expliquant la démarche, les indicateurs utilisés et des exemples d'interprétation des sorties de Syst'N®. Ce ne sont pas des ressources clés en main, mais bien des ressources adaptables au public, aux objectifs du groupe et à la sensibilité du formateur.

3.2 La base de données Pertazote pour mettre les résultats à disposition

Dans le cadre du projet, une version ultérieure (2.0) de la base de données Pertazote a été conçue. Elle permet de stocker les résultats de pertes azotées des simulations Syst'N réalisées au cours du projet (en plus d'autres simulations et résultats expérimentaux). Des interfaces web conviviales permettent aux utilisateurs de visualiser le contenu de la base, de faire des requêtes en fonction de différents critères liés à leurs systèmes (culture, fertilisation) à leur localisation (région) ou la présence ou non de mesures parmi les résultats.

Conclusion

Le projet Agro-éco-Syst'N a permis d'atteindre des résultats de différentes natures, à la croisée entre recherche, développement et formation. Il a permis de parvenir à la version 1.5 de l'outil Syst'N®[3], adaptée à un éventail plus varié de cultures que dans sa version initiale, plus fiable et opérationnelle pour une gamme élargie de systèmes de production agroécologiques et d'usages, accompagnée de la version 2.0 de la base de données Pertazote. Une méthode opérationnelle et formalisée de diagnostic des pertes d'azote au champ a également abouti, elle intègre la lixiviation du nitrate et la volatilisation de l'ammoniac à l'échelle pluriannuelle du système de culture, inséré dans son contexte pédoclimatique. Le projet a permis de produire la description et l'analyse, dans leur diversité, d'une vingtaine de systèmes de culture pratiqués et leurs résultats en termes de production et de pertes d'azote, estimées avec Syst'N®. Enfin, il a permis la mise à disposition à des agriculteurs, de leurs conseillers, des formateurs et des enseignants, non seulement des références acquises sur les systèmes diagnostiqués dans le projet, mais aussi d'un guide d'utilisation pédagogique de ces cas-types et d'un guide de la gestion de l'azote pour des systèmes à faibles pertes d'azote.

Références bibliographiques

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model. Editions Quae.

Confalonieri R., Bechini L., 2004. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. European Journal of Agronomy, 21, 223-237.

Corre-Hellou G., Brisson N., Launay M., Fustec J., Crozat Y., 2007. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea–barley intercrops given different soil nitrogen supplies. Field Crops Research, 103, 76-85.

Erisman J.W., Bleeker A., et al., 2007. Reduced nitrogen in ecology and the environment. Environmental pollution 150(1): 140-149.

Galloway J.N., Aber J.D., et al., 2003. The nitrogen cascade. Bioscience 53(4): 341-356.

[3] http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=8

Hannebert B., 2015. Adaptation of the Syst'N model to intercrops accounting for end-users constraints: calibration step. ISARA-Lyon.

Naudin C., 2009. Nutrition azotée des associations pois-blé d'hiver (*Pisum sativum* L. – *Triticum aestivum* L.) : Analyse, Modélisation et Propositions de stratégies de gestion. Sciences Agronomiques. Université d'Angers, Angers, France, p 119

Parnaudeau V., Reau R., Dubrulle P., 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel Syst'N. *Innovations Agronomiques*, 21, 59-70.

Sutton M., Howard C., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizetti B., 2011. The European Nitrogen Assessment - Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press, UK, 664 p.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)