

Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture: le logiciel Syst'N

Parnaudeau V.¹, Reau R.², Dubrulle P.³

¹ UMR 1069 SAS Rennes-Quimper, INRA-Agrocampus Ouest, CS 84215, F-35042 Rennes cedex

² UMR 211 Agronomie Grignon, INRA-AgroParisTech, BP 1, F-78850 Thiverval Grignon

³ US AgrolImpact Laon-Mons, INRA, Estrées-Mons BP 50136, F-80203 Péronne cedex

Correspondance : Virginie.Parnaudeau@rennes.inra.fr

Résumé

La gestion des cycles des éléments minéraux tels que l'azote dans les systèmes de production agricole se trouve au cœur d'enjeux d'actualité. Pour répondre à ces nouveaux enjeux, le RMT Fertilisation et Environnement a entrepris de contribuer au diagnostic des pertes d'azote en construisant l'outil Syst'N dans cadre du projet AZOSYSTEM qui regroupe l'INRA et 8 Instituts techniques agricoles. Son objectif est de contribuer au diagnostic et à l'évaluation des pertes d'azote en prenant en compte les conséquences des successions des cultures et des techniques culturales à effet direct ou indirect, à court et plus long terme, sur la dynamique de l'azote. L'outil Syst'N est constitué d'un simulateur basé sur un modèle des flux d'azote dans le système sol-plante-atmosphère et d'une base de données permettant de capitaliser et de consulter les résultats disponibles en matières de pertes d'azote issues de simulations ou d'expérimentations virtuelles, comme d'expérimentations réelles avec mesures au champ. Le prototype de l'outil est en cours de test avec des partenaires du développement agricole et des acteurs de la gestion qualitative de l'eau. L'objectif du projet est maintenant de proposer une version opérationnelle de l'outil Syst'N, de l'améliorer tout en préparant la mise en œuvre d'un diagnostic des pertes d'azote conduisant à une amélioration de la gestion de l'azote.

Mots-clés : azote, systèmes de culture, diagnostic environnemental, émissions gazeuses, nitrates

Abstract: A tool to assess N losses towards environment at the cropping system scale: the software Syst'N.

Development of sustainable agriculture, reducing N losses (under gaseous or nitrate forms) and avoiding pollution swapping, rely on production system diagnosis and design of innovative systems. In this context, one of the acute issues remains the improvement of nitrogen management, based on assessment and diagnosis of nitrogen use by the plant, losses and impacts in agricultural systems. Based on these observations, a Decision Support System (DSS), called Syst'N, has been developed. This tool, dedicated to stakeholders or agricultural extension services, has involved specific modelling and software design choices. It consists of an N loss database coupled with an N fluxes and losses simulator. The DSS conception included the choice and development of a dynamic N model. We have integrated existing up-to-date sub-models from the literature and adapted some of them for our specific purpose, i.e. valid in a large range of agricultural, soil and climatic conditions. The selected sub-models were also chosen because of their reliability when used with available data of target users. We are now going to continue the tool design and assessment, by involving stakeholders in the improvement of the DSS through a learning loop, and we will develop a learning activity with advisers in order to improve assessment of N losses and nitrogen management.

Keywords: nitrate leaching, gaseous emissions, decision support system, nitrogen management, soil

Enjeux de la gestion de l'azote

La gestion des cycles des éléments minéraux dans les systèmes de production agricole se trouve au cœur d'enjeux d'actualité (sécurité alimentaire mondiale, gestion durable et partagée de ressources non renouvelables, émission de gaz à effet de serre et qualité de l'air, qualité et potabilité de l'eau, qualité des produits de récolte, maîtrise des coûts de production agricole, ...). Dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, l'utilisation d'engrais azotés de synthèse a permis une croissance de la production agricole mais a également généré une augmentation des émissions d'azote vers l'environnement (Sutton et al, 2011). Ces émissions d'azote représentent un coût pour la société : dégradation de la qualité de l'air et de l'eau, en relation avec les impacts sur les écosystèmes et la santé humaine, changement climatique. Les impacts négatifs sont en particulier causés par le nitrate (NO_3^-), l'ammoniac (NH_3) et le protoxyde d'azote (N_2O). Ces formes d'azote ont pour conséquence une dégradation de la qualité des eaux de boisson (NO_3^-), une augmentation de l'eutrophisation (NO_3^- , NH_3), une réduction de la biodiversité en favorisant les espèces nitrophiles (NO_3^- , NH_3), ainsi qu'une contribution à l'effet de serre (N_2O) et à l'acidification des sols (NH_3). Mais ces émissions d'azote sont aussi une perte directe, et donc un coût économique, pour les exploitations agricoles. En effet, l'agriculteur réalise des apports réguliers d'azote, dans le but d'atteindre ses objectifs de production, mais la totalité de l'azote apporté peut ne pas être valorisée par les plantes, notamment en raison de ces transferts à l'extérieur du système cultivé. Les exploitations ont récemment vu le coût des engrais azotés augmenter, ce qui rend les économies d'azote indispensables.

Optimiser l'utilisation de l'azote dans les sols et dans les systèmes de culture, favoriser son recyclage est devenu un enjeu majeur, à la croisée des enjeux de la production agricole et des préoccupations de la société.

Or, pour limiter les pertes d'azote, la seule maîtrise de la fertilisation azotée des cultures, aussi raisonnée soit-elle, est devenue insuffisante. Les diagnostics à l'échelle de chaque culture et de chaque année sont insuffisants, car la dynamique de l'azote dans les parcelles est très dépendante des interactions entre les cultures successives (effet précédent et effet suivant) comme des flux à l'échelle du territoire (exemple de la dénitrification des eaux de surfaces dans les zones humides dont l'azote nitrique a notamment pour origine des parcelles situées en amont du bassin). De même, on a pu constater des modifications de pratiques agricoles conduisant à des transferts de pollutions. C'est le cas par exemple de l'interdiction de l'épandage de lisier en automne pour limiter la lixiviation de nitrate, qui a conduit à des émissions d'ammoniac plus importantes au printemps (Hertel *et al.*, 2011). Enfin, une meilleure prise en compte des produits résiduels organiques dans les outils de gestion d'azote est nécessaire pour améliorer le recyclage de l'azote, les outils étant plus performants en ce qui concerne les engrais minéraux.

Les enjeux généraux sur la gestion de l'azote peuvent se décliner en enjeux scientifiques et techniques :

- mieux comprendre et hiérarchiser les processus biophysiques qui génèrent les pertes d'azote et les quantifier à l'échelle des systèmes de culture,
- permettre aux acteurs de la gestion de l'azote de faire un diagnostic des pertes en mobilisant des connaissances scientifiques et techniques pertinentes.

Pour pallier le manque d'outils opérationnels et adaptés à l'échelle pluriannuelle du système de culture, permettant de prédire les fuites d'azote sous différentes formes (nitrate vers les eaux, ammoniac et protoxyde d'azote vers l'atmosphère), le RMT Fertilisation et Environnement a donc entrepris de contribuer au diagnostic des pertes d'azote en construisant l'outil Syst'N, dans cadre du projet AZOSYSTEM, qui regroupe l'INRA et 8 instituts techniques agricoles (ACTA, Arvalis, Cetiom, CTIFL, IE, IFIP, ITAVI, ITB).

Les avancées du diagnostic des pertes d'azote

Le besoin d'outil de diagnostic des pertes d'azote n'est pas nouveau. Devant la variabilité des pertes suivant les systèmes de culture, les sols et le climat, et la difficulté d'extrapoler simplement les rares résultats expérimentaux disponibles, des demandes ont été faites par des praticiens impliqués dans la gestion de l'azote et l'environnement comme les ingénieurs des Chambres d'agriculture, les animateurs des opérations Fertimieux, l'industrie des engrais, les Agences de l'eau ...

Face à l'absence d'outils disponibles correspondant à leur cahier des charges, ces praticiens ont utilisé des outils (gestion de l'interculture par le CORPEN, grille de risques Fertimieux) ou une batterie de variables simples (dose d'azote, nombre d'apports, % sol nu), en se rendant rapidement compte de l'importance de quantifier plus directement ces pertes pour faciliter et objectiver la hiérarchie des risques entre parcelles, comme pour réaliser des estimations globales à l'échelle d'une rotation ou d'un assolement.

Pour quantifier les risques de pertes, l'approche la plus courante jusqu'à récemment a été le recours à des bilans d'azote obtenus par différence entre les entrées et les sorties d'azote dans le système. Utilisés à des échelles très variées, ces bilans d'azote ont montré beaucoup trop de limites aux échelles annuelle et pluriannuelle et à la parcelle. Ils se sont révélés être plus aptes à identifier les exploitations et les régions à fort excédent d'azote, à évaluer les conséquences d'une évolution de la fertilisation d'une culture en particulier qu'à comparer des rotations, à rendre compte d'une évolution des successions de culture, ou de l'introduction d'une culture intermédiaire (Reau et al., 2000).

Pour les pertes gazeuses d'azote, l'approche est encore plus simpliste : on a développé des indicateurs dépendant avant tout des engrais apportés : indicateur des émissions de protoxyde d'azote proportionnel à la dose de l'IPCC (International Panel on Climate Change), volatilisation d'ammoniac proportionnelle à la dose avec un facteur dépendant de la forme de l'azote (COMIFER).

Depuis quelques années, se sont développés des indicateurs plus complexes faisant des bilans d'azote sur l'azote minéral plutôt que sur l'azote total. Deux outils sont utilisés par les praticiens pour estimer les pertes de nitrates dans les systèmes de culture courants. L'indicateur IN de Indigo estime les pertes d'azote sous ses trois formes principales en restant actuellement à l'échelle annuelle (parcelle isolée ou assolement), avec des indicateurs qui sont restés moins élaborés pour l'ammoniac et le protoxyde d'azote tout en allant plus loin que la seule prise en compte de la dose des outils précédents. Un autre outil, DEAC (Cariolle, 2001), aborde les pertes d'azote aux différentes échelles de la rotation comme de l'assolement, seulement pour les fuites de nitrates. Enfin, il existe différents modèles dynamiques permettant de restituer les flux d'azote dans les parcelles cultivées (Cannavo *et al.*, 2008), mais des améliorations, voire des changements de paradigme, sont nécessaires afin qu'ils puissent être appropriés et utilisés par les praticiens et porteurs d'enjeux (Cox, 1996, McCown, 2002a, McCown, 2002b).

Cet état des lieux des outils pratiques disponibles révèle que l'on dispose d'ores et déjà d'outils répondant en partie à des besoins concernant les nitrates. Ils ont aujourd'hui permis de répondre à des questions sur l'évolution de la qualité des eaux à attendre des améliorations des pratiques obtenues suite à une opération collective de conseil dans un bassin comme à l'ébauche d'un référentiel régional de pertes de nitrates. Dans le domaine des nitrates, les outils suivent d'assez près l'évolution des connaissances ; pour les pertes gazeuses, le décalage entre les connaissances et les outils pratiques est plus important. En effet, les indicateurs actuellement utilisés restent très sommaires. Ils prennent peu en compte le sol et le climat qui pourtant sont déterminants dans les phénomènes de pertes gazeuses.

Une analyse des besoins pour l'écriture du cahier des charges

La première phase du projet a commencé par des enquêtes auprès de 28 différents acteurs de l'agriculture et de l'environnement, destinées à connaître leurs préoccupations concernant les pertes d'azote dans les agro-systèmes, ainsi que les conditions d'usage des outils utilisés dans leur activité (Parnaudeau *et al.*, 2007).

L'enquête a révélé une grande diversité de postures vis-à-vis de l'azote dans les parcelles agricoles, notamment suivant la fonction des organismes auxquels les acteurs sont rattachés et suivant le rôle que chacun y joue. Cela a conduit à la définition de types d'utilisateurs potentiels dont les attentes et les besoins ont été identifiés. Deux types d'utilisateurs sont principalement ciblés pour l'outil Syst'N : ceux qui sont préoccupés par la qualité de l'air, et ceux qui sont préoccupés par la qualité de l'eau : gestionnaires de ressources, acteurs des opérations d'amélioration de la qualité de l'eau ou de l'air (suivi-évaluation), réalisateurs de diagnostics, chercheurs d'améliorations des systèmes de culture. Cependant, il est également nécessaire de fournir un outil qui soit aussi utilisé par les personnes qui font du conseil de fertilisation, même si elles ne constituent pas la première cible de l'outil.

Des enquêtes, sont ressorties un certain nombre de caractéristiques de l'outil qu'il semble nécessaire de prendre en compte pour qu'il soit utilisé :

- besoin d'y voir plus clair sur les pertes d'azote et ses impacts environnementaux suivant le sol, le climat, et les pratiques agricoles,
- pour estimer les pertes d'azote suivant les pratiques agricoles, demande d'un diagnostic dans la dimension pluriannuelle du système de culture, en intégrant les effets précédents des cultures comme les effets cumulatifs dans la rotation,
- besoin d'une fiabilité « scientifique » certaine, d'une part pour effectuer des diagnostics ou des évaluations pour des systèmes où il y a peu ou pas de mesures, et d'autre part pour extrapoler des résultats ou des diagnostics issus des systèmes mieux connus,
- une demande plus orientée vers un outil permettant une hiérarchie des risques, une comparaison de performances que la production de valeurs absolues dans une parcelle isolée,
- nombre de ces personnes ne souhaitent pas *a priori* utiliser directement un « simulateur », par manque de temps. Ces personnes sont par contre demandeuses de références utiles pour l'action, obtenues à partir des résultats de simulations ou bien issues d'expérimentations.

A l'issue de cette étape, le projet a pu être délimité dans ces contours et ses objectifs. L'échelle spatiale de fonctionnement de l'outil serait la parcelle, tout en permettant une agrégation des résultats de pertes à une échelle spatiale supérieure (la sole, l'exploitation agricole, un territoire de parcelles contigües...). L'échelle de temps privilégiée serait l'échelle pluriannuelle de la rotation des cultures, tout en ayant accès à la contribution de chaque campagne culturale, et à la dynamique des pertes au sein de chaque campagne. Les sorties devraient intégrer les risques liés à la variabilité interannuelle du climat. Enfin, un accent particulier serait mis sur l'ergonomie de l'outil, notamment pour la prise en compte de la diversité des systèmes de culture à l'échelle locale ou régionale. Le choix a alors été fait de construire un outil de diagnostic comprenant d'une part un simulateur « convivial » pour l'utilisateur (avec des processus simulés suffisamment complexes pour hiérarchiser les risques environnementaux), et d'autre part une base de données permettant de générer et de stocker des références de pertes d'azote régionalisées utilisables par de nombreux organismes ou personnes (Figure 1).

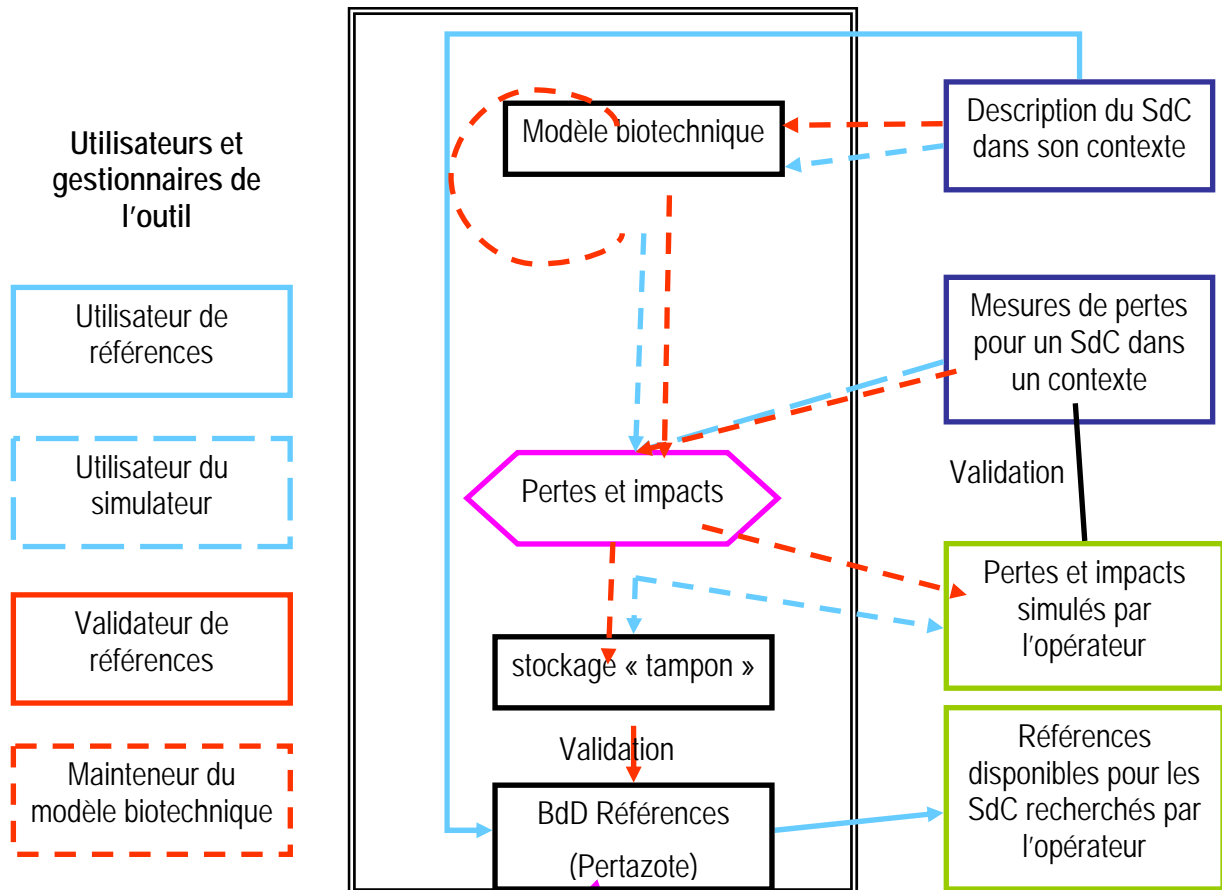


Figure 1 : Schéma de l'outil de diagnostic des pertes d'azote (SdC : système de culture ; BdD : base de données).

Les principaux choix informatiques

La structure de l'outil a été formalisée dans un cahier des charges (Figure 1). L'outil est un logiciel, constitué :

- d'une base de données de « références » de pertes d'azote (appelée Pertazote) ; c'est une base de consultation regroupant des simulations déjà réalisées et les mesures disponibles, qui peut être interrogée par l'utilisateur par simple requête. Cette base de données est constituée par les simulations effectuées et les mesures saisies par des utilisateurs, et d'une synthèse pour constituer un référentiel agronomique de pertes fiable et utilisable par des tiers,
- d'un simulateur de pertes d'azote vers l'environnement, qui utilise un modèle biotechnique permettant de simuler les flux d'azote dans les systèmes de culture au pas de temps de la journée.

Une architecture informatique a été définie et des diagrammes UML (diagrammes de composants, de classes, de séquences) ont été réalisés notamment pour décrire les informations utiles dans les interfaces de saisie pour le système de culture, le sol et le climat. Cette architecture s'articule autour d'une part d'un ou plusieurs serveurs et d'autre part de postes clients des utilisateurs. Sur les serveurs, se trouvent :

- le simulateur mettant en œuvre les formalismes retenus et une base de paramétrage contenant les paramètres nécessaires à (i) la description des situations simulées (récupérables par les applications clientes) et (ii) aux calculs réalisés par le simulateur. Sur le même serveur, se

trouve une application permettant la communication entre les applications clientes et le simulateur,

- la base de données de pertes d'azote géré sous Postgresql (sous Linux) et contenant la description des situations, les données éventuellement mesurées et le cas échéant, les résultats de simulation au pas de temps décennaux,
- un site web dynamique avec utilisation d'Apache et Php5. Le système de gestion de la base de données permet d'accéder à la base de données de pertes d'azote et comprend quatre fonctions principales : la validation et le stockage des données de mesures ou de simulations proposées d'une part, la consultation et l'extraction des données par les utilisateurs d'autre part.

Sur leur poste, les utilisateurs disposeront d'une application cliente fournissant des interfaces utilisateur permettant (i) la description d'un ensemble de situations, (ii) la constitution du fichier d'entrée du simulateur correspondant, (iii) son envoi sur serveur pour simulation via internet, (iv) la récupération des résultats de simulation, (v) l'exploitation de ces résultats (synthèses sous forme de tableaux et de graphiques). Les fichiers de données échangés entre les différents composants sont au format XML.

Certaines possibilités d'évolution et de configuration des interfaces ont été externalisées dans le but de limiter la reprogrammation autant que possible.

Les interfaces

L'outil comprend en outre une interface Homme-Machine permettant de saisir les données d'entrée (Figure 2) et de visualiser les fuites d'azote sous différentes formes. L'interface d'entrée inclut des données par défaut, et permet la comparaison de différents systèmes de culture et la prise en compte de la variabilité du climat. Afin de faciliter l'activité des utilisateurs, une base de référence propose une description de sols régionaux et de systèmes de culture existants. Chaque dossier de simulation décrit le système de culture dans son contexte, via une arborescence située dans la partie gauche en haut de l'écran. Il comprend (i) la description du sol, (ii) l'histoire de la parcelle, (iii) la succession des cultures, (iv) et l'itinéraire technique de chaque culture, décrit sous la forme d'une suite d'interventions culturales (fertilisations organique et minérale, travail du sol, irrigation, pâture, fauche, culture piège à nitrate). L'arborescence facilite la multiplication des systèmes de culture à simuler, et la copie des éléments d'un fichier à l'autre est utilisable pour répéter une culture dans une même rotation, un simple couper-coller suffit pour changer de place une culture dans la succession des cultures. Lors de la lecture du fichier d'entrée, la mise en forme de cette arborescence est basée sur un fichier XML, créant ainsi les items, et attribuant leurs noms selon les critères voulus. L'existence de ce fichier XML permet ainsi de modifier et d'adapter la structure de l'arborescence sans nécessiter de programmation dans un grand nombre de cas. D'autre part, ce système peut être réutilisable dans d'autres projets pour présenter des données stockées en XML comme les systèmes de culture.

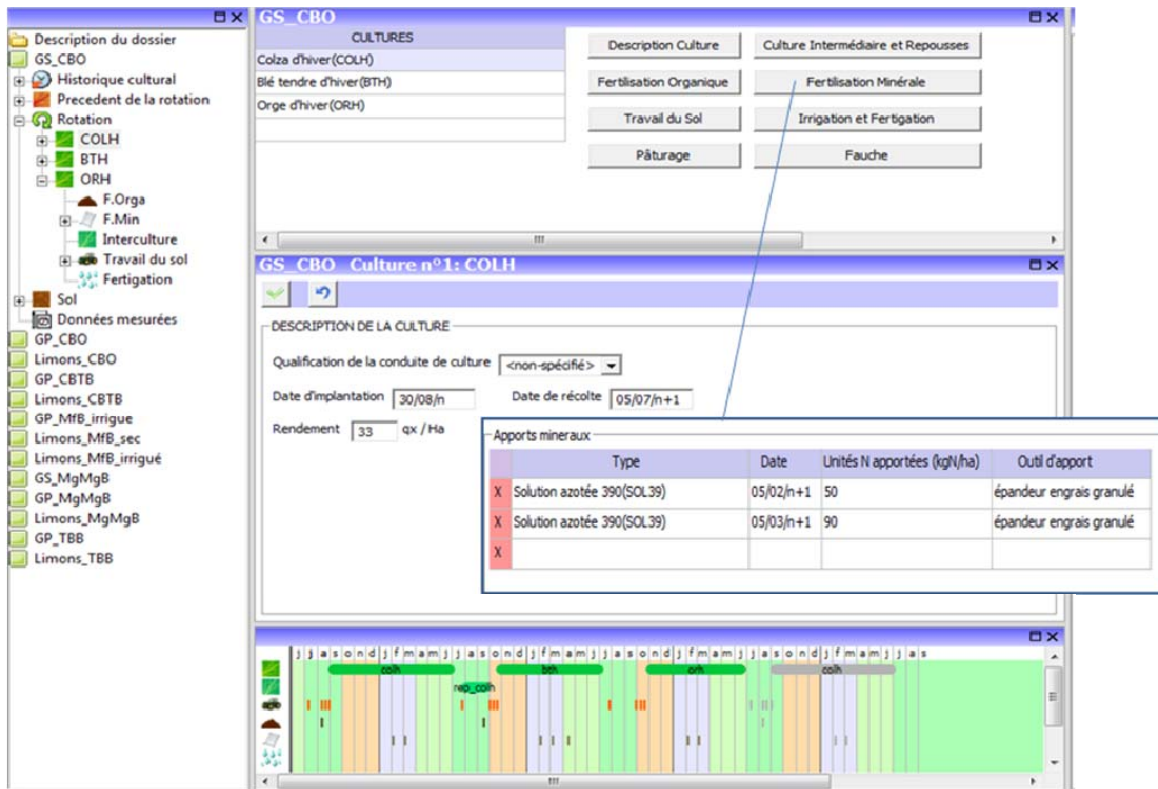


Figure 2 : Partie de l'interface d'entrée. A gauche l'arborescence du système de culture, au centre la description de la culture, en encadré un exemple d'interventions à renseigner, en bas un récapitulatif synoptique de la succession des interventions culturales.

L'analyse de l'effet de la variabilité interannuelle du climat ou la transposition d'un système dans un autre contexte est facilitée par l'utilisation d'une date générique pour chaque intervention. Conçu avec une approche générique, l'interface graphique pourrait être utilisée pour d'autres outils travaillant à l'échelle du système de culture ou dans des plateformes de modélisation.

L'interface propose des jeux de données types par région, pour les valeurs représentatives de sols, et le système de culture. L'utilisateur peut ainsi réaliser des simulations réalistes, basées sur un modèle qui présente une complexité suffisante pour hiérarchiser les situations, sans être un spécialiste ni avoir à investir beaucoup de temps pour renseigner les variables d'entrée. Une partie de ces jeux de données types est mise à jour sur le poste client à partir du serveur-simulateur.

Dans la perspective d'estimer, de comprendre, d'expliquer les pertes de nitrate et de réaliser des diagnostics, des interfaces de sortie sont en cours de réalisation. L'utilisateur peut visualiser en premier lieu un bilan d'azote moyenné sur la rotation et exprimé en kg d'azote par ha et par an, qui est mis en regard des pertes calculées par le simulateur, exprimées dans les mêmes unités. Dans les deux écrans suivants, l'utilisateur visualise les pertes d'azote sous les différentes formes tout au long de la rotation, trimestre par trimestre.

Le simulateur

Une analyse bibliographique exhaustive a d'abord été réalisée afin de faire l'état de l'art des modèles et des outils disponibles pour estimer les pertes d'azote dans les sols cultivés (Cannavo *et al.*, 2008). Sur cette base, nous avons sélectionné et assemblé des formalismes de modèles existants, et correspondant au cahier des charges, à savoir utilisables pour une gamme large de systèmes de culture et de situations pédoclimatiques, et cohérents avec les données d'entrée dont disposent les utilisateurs potentiels.

Le simulateur est ainsi basé sur un modèle dynamique de simulation des flux d'azote dans le système sol-plante-atmosphère (Figure 3), fonctionnant à un pas de temps journalier (pour pouvoir simuler la volatilisation notamment), et permettant l'enchaînement de plusieurs années culturales. Il calcule les flux d'azote dans le sol et en direction des compartiments eau et air, à partir des données d'entrée décrivant le climat, le sol et le système de culture.

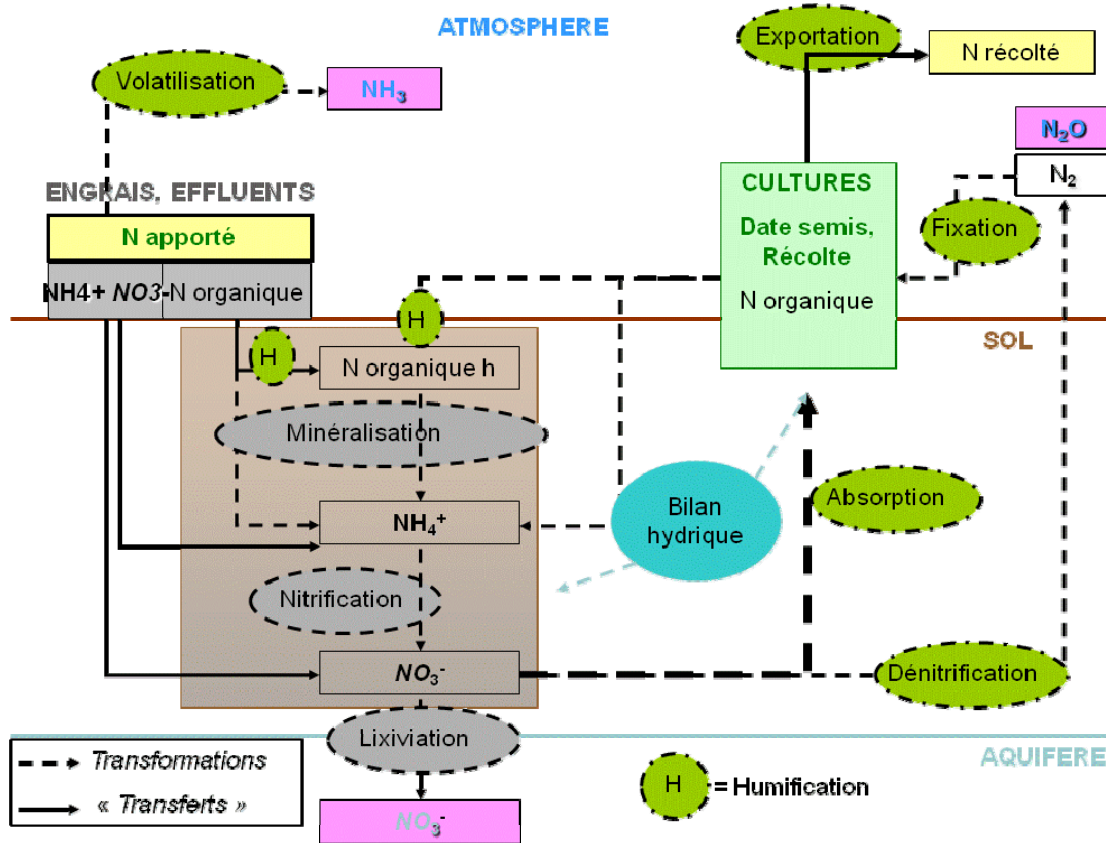


Figure 3 : Schéma du simulateur de flux d'azote dans le système sol-culture-atmosphère-eau.

Le modèle se compose de modules représentant les grands types de transformations ou de transferts de l'azote dans le système. Ces modules sont fondés sur des concepts et des formalismes issus de la bibliographie internationale, la plupart déjà utilisés dans des modèles adaptés aux conditions françaises. Les modules ont été sélectionnés avec l'objectif de conserver un niveau de complexité cohérent entre les différents modules, tout en intégrant des connaissances récentes sur les flux d'azote.

Ainsi, le modèle intègre des modules existants issus de AZOFERT (Machet *et al.*, 2004) pour la minéralisation de la matière organique et des résidus de récolte, AZODYN (Jeuffroy *et al.*, 1999) pour l'absorption d'azote par les cultures, et STICS (Brisson *et al.*, 1998) pour le bilan hydrique et la lixiviation des nitrates. Il reprend également le modèle NOE (Hénault *et al.*, 2005) pour simuler les pertes de N₂O par dénitrification, ainsi que des concepts du modèle Volt'air (Génermont *et al.*, 1997) adaptés à notre cahier des charges pour les émissions d'ammoniac par volatilisation au champ. Tous ces formalismes ont été réécrits pour Syst'N, afin de correspondre à la structure informatique choisie, ainsi qu'aux données et paramètres disponibles auprès des utilisateurs visés. Certains paramétrages ont été réalisés lors du projet pour des modules, comme la minéralisation des effluents organiques par exemple.

Modules du modèle dynamique

Transferts d'eau et d'azote minéral dans le sol

C'est un module unique qui effectue à la fois le bilan hydrique (apports d'eau, évaporation, prélèvement par les plantes), les transferts d'eau dans le sol (drainage, ruissellement), ainsi que les transferts de nitrate par lixiviation.

Le modèle utilisé est un modèle à réservoir repris des modèles Lixim (Mary *et al.*, 1999) et STICS (Brisson *et al.*, 2008). Chaque couche élémentaire de sol constitue un réservoir, caractérisé par son humidité à la capacité au champ, son humidité au point de flétrissement, sa conductivité hydraulique à saturation et son humidité à saturation.

Les transferts d'azote nitrique se font parallèlement aux transferts d'eau : dans chaque couche élémentaire de sol, une concentration en N-NO₃ est calculée. Le flux d'eau sortant de cette cellule est caractérisé par cette concentration, permettant le calcul de la quantité d'azote nitrique transférée.

Dénitrification

Ce module calcule les pertes d'azote sous formes gazeuses (N₂O et N₂) par dénitrification, ainsi qu'une estimation des émissions de N₂O issues de la nitrification. Il fournit au simulateur la quantité d'azote minéral restant dans chaque couche élémentaire du sol, et les quantités d'azote émises sous formes gazeuses pour l'ensemble du profil (N-N₂O) et (N-N₂).

Le calcul se base sur le modèle NOE (Hénault *et al.*, 2005), dans le lequel une dénitrification potentielle est modulée par des coefficients traduisant les effets respectifs de la température, du pH, de l'humidité et de l'azote minéral du sol, afin de calculer la dénitrification réelle.

Le N₂O issu de la dénitrification est calculé à l'aide d'un coefficient représentant le rapport N₂O / (N₂O + N₂), issu des travaux de Hénault *et al.* (2005). Le calcul est effectué dans chaque couche élémentaire du sol, jusqu'à la profondeur de la couche minéralisante de la matière organique du sol.

Volatilisation

La sortie de ce module est la quantité d'azote volatilisé sous forme de NH₃. Pour chaque engrais et produit résiduaire organique (PRO), une quantité d'azote potentiellement volatilisable est calculée dans le module « interventions ». Le module « volatilisation » discrimine le potentiel selon le pH du sol (sols calcaires ou non).

Ce potentiel est ensuite affecté de différentes fonctions de réponse soit globales (s'appliquant uniformément, avec la même valeur, tous les jours à partir d'un jour défini) soit journalières (s'appliquant ponctuellement sur un jour donné, et n'ont pas d'influence directe sur les jours suivants). L'effet de chaque engrais ou PRO est pris en compte pendant 20 jours à partir de son application ou, le cas échéant, jusqu'à ce que le module « interventions » stoppe la volatilisation du produit (par un enfouissement du produit par exemple). A la fin des 20 jours, l'azote ammoniacal non volatilisé est considéré comme nitrifié.

Dans une version ultérieure, ces fonctions de réponse pourront être améliorées ou remplacées par des fonctions générées par le modèle Volt'air (Génermont et Cellier, 1997).

Paramétrage et tests du simulateur

Le simulateur est actuellement paramétré pour les principales grandes cultures et en cours de test pour celles-ci. Pour les grandes cultures, il est envisagé d'utiliser le rendement des cultures demandé en entrées pour corriger le prélèvement d'azote simulé en fin de culture, en utilisant un coefficient de correction mobilisant l'indice de récolte dans un premier temps. Il a effectivement été montré que les modèles de simulation étaient moins aptes à restituer l'azote minéral dans le sol à la récolte que des

indicateurs plus sommaires prenant en compte le rendement réel (Makowski *et al.*, 2009). La modélisation des prairies est en cours de réalisation, et celle des cultures légumières sera bientôt initiée. Deux défis majeurs pour mieux gérer l'azote dans le système sol-culture consistent également à améliorer (i) la prise en compte des légumineuses dans les rotations, y compris en association, sur la nutrition azotée et les pertes d'azote, et (ii) la modélisation de l'effet d'apports répétés d'effluents organiques sur la minéralisation de l'azote du sol à moyen terme.

Le modèle est également testé au regard de mesures de pertes. Il a été confronté à des résultats expérimentaux de lixiviation en sol nu interprétés avec Lixim (Figure 4). Les tests vont se poursuivre avec des résultats de lixiviation à l'échelle de la rotation.

Par ailleurs, des tests portant sur la dénitrification seront réalisés cette année avec les résultats obtenus en parcelles agricoles dans le cadre d'un projet soutenu par le Casdar, intitulé No-Gas.

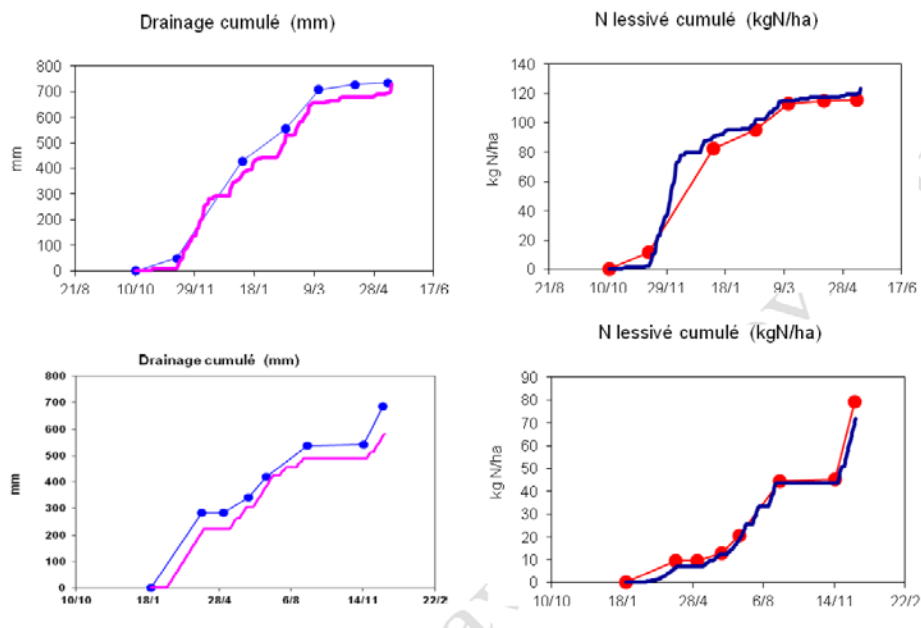


Figure 4 : Comparaison entre les résultats de drainage et de lixiviation de l'outil Syst'N (trait sans marque) et les résultats expérimentaux (trait avec les points) ; haut : Crecom (22), essai Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) ; bas : Trévarez (29), essai CRAB, projet Casdar Gestion durable de sols.

La base de données de pertes d'azote

Cette base de données vise à proposer des résultats de simulations et de mesures de pertes d'azote. Des résultats bruts (décadaires) mais aussi des résultats synthétisés permettant à un utilisateur d'avoir des repères sur les pertes d'azote dans un système de culture qu'il connaît ou qu'il envisage de mettre en œuvre. Ces résultats seront interrogeables par des formulaires et des requêtes via une interface web.

La base de données de pertes en azote répond aux besoins de l'utilisateur qui ne souhaite pas réaliser de simulations. L'objectif est ici d'éclairer les utilisateurs sur les pertes d'azote sans les obliger à rentrer dans un processus de simulation qui reste assez long compte tenu des informations à saisir en entrée. Il s'agit ainsi d'abord de leur fournir des références sur les pertes d'azote dans leur situation. Si ces références sont disponibles, l'utilisateur y aura ainsi rapidement accès au bout de quelques clics. Sinon, l'utilisateur sorti « bredouille » de sa requête sera alors invité à mobiliser le simulateur afin de réaliser une estimation des pertes d'azote à l'aide du simulateur, ce qui lui permettra de se mettre dans sa situation propre (système de culture, sol, climat).

Un outil pour le diagnostic des pertes d'azote au sein des territoires

L'état des lieux sur les demandes faites par les praticiens impliqués dans la gestion de l'azote et l'environnement, et sur les outils disponibles, a montré la nécessité de mettre au point un outil qui combine facilité d'utilisation et fiabilité suffisante pour hiérarchiser les risques d'impacts liés aux pertes d'azote. Deux choix principaux ont été faits dans le but de concilier simplicité et performance de l'outil : la création d'une base de données de pertes d'azote et l'élaboration de jeux de données types pour les variables d'entrée du simulateur. Ces deux choix ont largement contribué à la création d'un outil qui réponde aux attentes d'utilisateurs variés, et notamment des acteurs n'étant pas à la fois des spécialistes des sols, des pratiques culturales et de l'éco-physiologie des plantes. Par ailleurs, l'évolution du contexte réglementaire lié à l'azote et les dispositifs qui se sont mis en place ces dernières années, par exemple sur les aires d'alimentation et de captage, ou la demande de méthodes d'inventaire d'émissions gazeuses prenant en compte plus de variabilité confirment l'utilité d'un tel outil.

La pertinence de la construction de l'outil repose également sur la distinction entre le rôle de concepteur et celui d'utilisateur, ainsi que sur la consultation d'utilisateurs potentiels avant, pendant et après la création du prototype. Cette démarche de co-construction itérative a été très riche. Elle a permis de préciser les besoins et les contraintes des utilisateurs, respectivement en termes de variables de sortie et d'entrée. Cette démarche a également été essentielle pour la conception des interfaces.

Cet outil ouvre ainsi des pistes pour le renouvellement des démarches de diagnostic des pertes d'azote, ainsi que de nouveaux indicateurs utilisables dans les évaluations multicritères des systèmes de culture. Face aux limites des outils basés sur la conformité des interventions aux « bonnes pratiques agricoles », ou sur les bilans annuels, Syst'N propose une évaluation des résultats des systèmes de culture en terme de contribution à la qualité de l'eau et de l'air, sous la forme d'une dynamique des pertes d'azote à l'échelle pluriannuelle dans une parcelle, ou encore pour l'ensemble des parcelles d'un bassin. De plus, les fonctionnalités qui ont été associées au simulateur en font un outil facile d'accès pour des acteurs du conseil aux agriculteurs ou de la gestion des territoires, avec un délai de saisie et de réponse qui n'excède pas quelques minutes, ce qui le différencie des modèles de recherche dont la prise en main initiale demande un investissement initial plus conséquent.

Un premier prototype de l'outil a été présenté aux journées du Réseau Mixte Thématique Fertilisation et environnement en janvier 2012. L'objectif du projet est maintenant de compléter le paramétrage et certains formalismes, de proposer un prototype opérationnel, de l'améliorer tout en préparant la mise en œuvre d'un diagnostic des pertes d'azote conduisant à une amélioration de la gestion de l'azote dans le système sol-cultures.

Remerciements aux contributeurs du projet : C. Aubert², A. Baillet³, N. Beaudoin¹, P. Béguin^{1*}, F. Butler⁶, P. Cannavo¹, J.-P. Cohan⁴, A. Dupont¹, R. Duval⁵, S. Espagnol⁹, J.-P. Fagniez¹, F. Flénet³, L. Fourrié⁶, S. Générumont¹, L. Guichard¹, M.-H. Jeuffroy¹, E. Justes¹, F. Laurent⁴, C. Le Gall³, J.-M. Machel¹, F. Maupas⁵, T. Morvan¹, S. Pellerin¹, C. Raison⁷, C. Raynal⁸, S. Recous¹, J. Thiard¹.

¹ INRA, Département Environnement et Agronomie et Département SAD, France ; ² ITAVI, France; ³ CETIOM, France; ⁴ ARVALIS-Institut du végétal, France; ⁵ ITB, France; ⁶ ACTA, France; ⁷ Institut de l'élevage, France; ⁸ CTIFL, France ; ⁹ IFIP, France.

Références bibliographiques

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

- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions Quæ, Paris, France.
- Cannavo P., Recous S., Parnaudeau V., Reau R., 2008. Modeling N dynamics to assess environmental impacts of cropped soils. *Advances in Agronomy* 97, 131-174.
- Cariolle M., 2001. DEAC-Azote : un outil pour diagnostiquer le lessivage de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole de polyculture. Proceedings of the 64th IIRB Congress, Bruges, Belgique.
- Cox P.G., 1996. Some issues in the design of agricultural decision support systems. *Agricultural systems* 52, 355-381.
- Génermont S., Cellier P., 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88, 145-167.
- Hénault C., Bizouard F., Laville P., Gabrielle B., Nicoulaud B., Germon J.C., Cellier P., 2005. Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology* 11, 115-127.
- Hertel O., Reis S., Skjøth C.A., Bleeker A., Harrison R., Cape J.N., Fowler D., Skiba U., Simpson D., Jickells T., Baker A., Kulmala M., Gyldenkerne S., Sørensen L.L., Erisman J.W., 2011. Nitrogen processes in the atmosphere. In: Sutton et al, (Eds.), *The European nitrogen assessment*, Cambridge University Press, UK, pp. 177-207.
- Jeuffroy M.H., Recous S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy* 10, 129-144.
- Machet J.M., Recous S., Jeuffroy M.H., Mary B., Nicolardot B., Parnaudeau V., 2004. A dynamic version of the predictive balance sheet method for fertiliser N advice. *Controlling Nitrogen Flos and Losses, Inst Grassland & Environm Res-193*.
- Makowski D., Tichit M., Guichard L., Van Keulen H., Beaudoin N., 2009. Measuring the accuracy of agro-environmental indicators. *Journal of Environmental Management* 90, Supplement 2, 139-146.
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 549-566.
- McCown R.L., 2002a. Locating agricultural decision support systems in the troubled past and socio-technical complexity of 'models for management. *Agricultural systems* 74, 179-220.
- McCown R.L., 2002b. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. *Agricultural systems* 74, 179-220.
- Parnaudeau V., Reau R., Duval R., Fourrié L., Gillet J.P., Guichard L., Justes E., Laurent F., Machet J.M., Maupas F., Morvan T., Raynal C., 2007. A sociological approach to determine the advisers and stakeholders requirements for nitrogen management and diagnosis tools. 15th European N workshop, Lleida.
- Reau R., 2000. Les indicateurs de pertes d'azote en systèmes de culture colza-céréales : cas du solde azote apport-export. *Les Rencontres Annuelles du CETIOM*, 30 novembre 2000, Paris.
- 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.