

DIAGNOSTIC DES PERTES D'AZOTE A L'ECHELLE DU SYSTEME DE CULTURE AVEC SYST'N

R. Reau¹, V. Parnaudeau¹, P. Dubrulle¹, 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, J.-M. Machet¹, F. Maupas⁵, T. Morvan¹, S. Pellerin¹, C. Raison⁷, C. Raynal⁸, S. Recous¹, J. Thiard¹.

¹ INRA, Département Environnement et Agronomie et Département SAD, France, raymond.reau@grignon.inra.fr; 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

Mots-clés : système de culture, diagnostic, nitrate, protoxyde d'azote, ammoniac

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 minières non renouvelables, émission de gaz à effet de serre et consommation/production d'énergie, qualité et potabilité de l'eau, qualité des produits, maîtrise des coûts de production agricole,...). 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 de ses flux à l'échelle du territoire (exemple de la dénitrification des eaux de surfaces chargées en nitrate dans les zones humides). Pour pallier le manque d'outils opérationnels et pertinents 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 centre et instituts techniques agricoles.

Les avancées du diagnostic des pertes d'azote

L'agriculteur réalise des apports réguliers d'azote, dans le but d'atteindre ses objectifs de production. La totalité de l'azote apporté n'est cependant pas valorisée par les plantes, notamment en raison de transferts à l'extérieur du système cultivé. Ces pertes représentent un impact économique. Elles ont également des conséquences négatives pour l'environnement ou pour l'usage de l'eau. 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).

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, le monde 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 de 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, on est passé à la mise au point d'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 courant. L'indicateur I_N 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 en 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.

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 préoccupant. 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.

Afin d'améliorer l'existant en matière de diagnostic des pertes d'azote, le projet Azosystem a donc entrepris de réaliser un outil : (i) estimant les émissions d'azote sous différentes formes et/ou vers différents compartiments de l'environnement, pour une gamme large de situations agro-pédo-climatiques, (ii) et prenant en compte les conséquences des successions de cultures et des techniques culturales à effet direct ou indirect, à court et plus long terme, sur la dynamique de l'azote. Il concilie pour cela (i) une base générique fondée sur une description mécaniste du cycle de l'azote (à l'instar des modèles de recherche comme STICS (Brisson *et al.*, 1998)) et (ii) un caractère opérationnel (large gamme de situations agro-pédo-climatiques, petit nombre de variables d'entrées à décrire, facilité d'utilisation pour le diagnostic des systèmes de culture).

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 ; 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 issus 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 sera 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 sera 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 devront intégrer les risques liés à la variabilité interannuelle du climat. Enfin, un accent particulier sera 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.

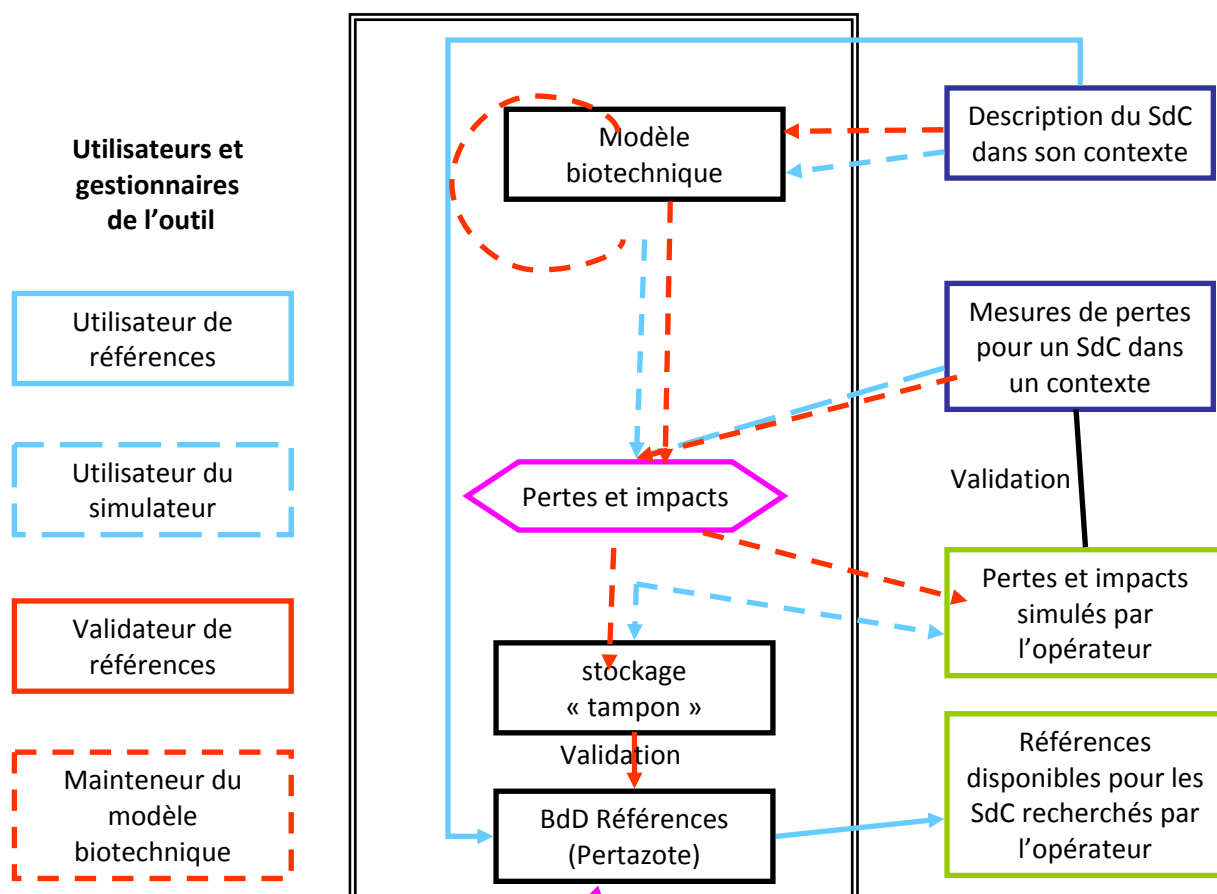


Figure 1 : Schéma de l'outil de diagnostic des pertes d'azote (SdC : système de culture ; BdD : base de données).

Les principaux choix informatiques

La structure de l'outil a été formalisée dans 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. Sa mise en forme est basée sur un fichier XML configuré lors de la lecture du fichier d'entrée, créant ainsi les items, et attribuant leurs noms selon les critères voulus. L'externalisation de la structure de l'arbre permet donc de modifier et d'adapter cette structure 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.

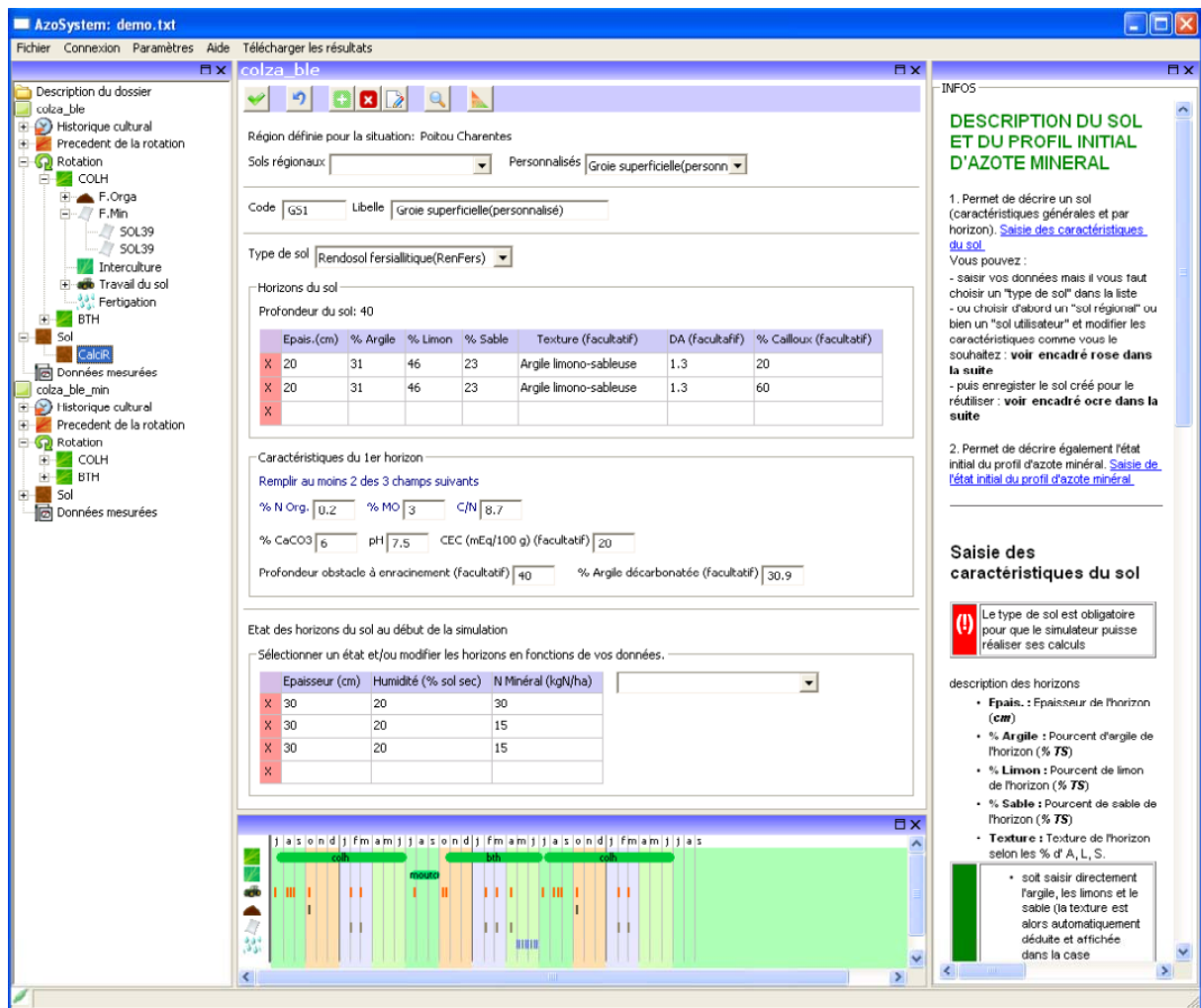


Figure 2 : Interface d'entrée. A gauche l'arborescence du système de culture, au centre la description du sol, à droite l'aide (instructions et informations) pour l'opérateur de saisie, en bas, un récapitulatif synoptique de la succession des interventions culturales).

Tout cela est facilité 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 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.

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 : 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. Le modèle se compose de modules représentant les grands types de transformations ou de transferts de l'azote dans le système.

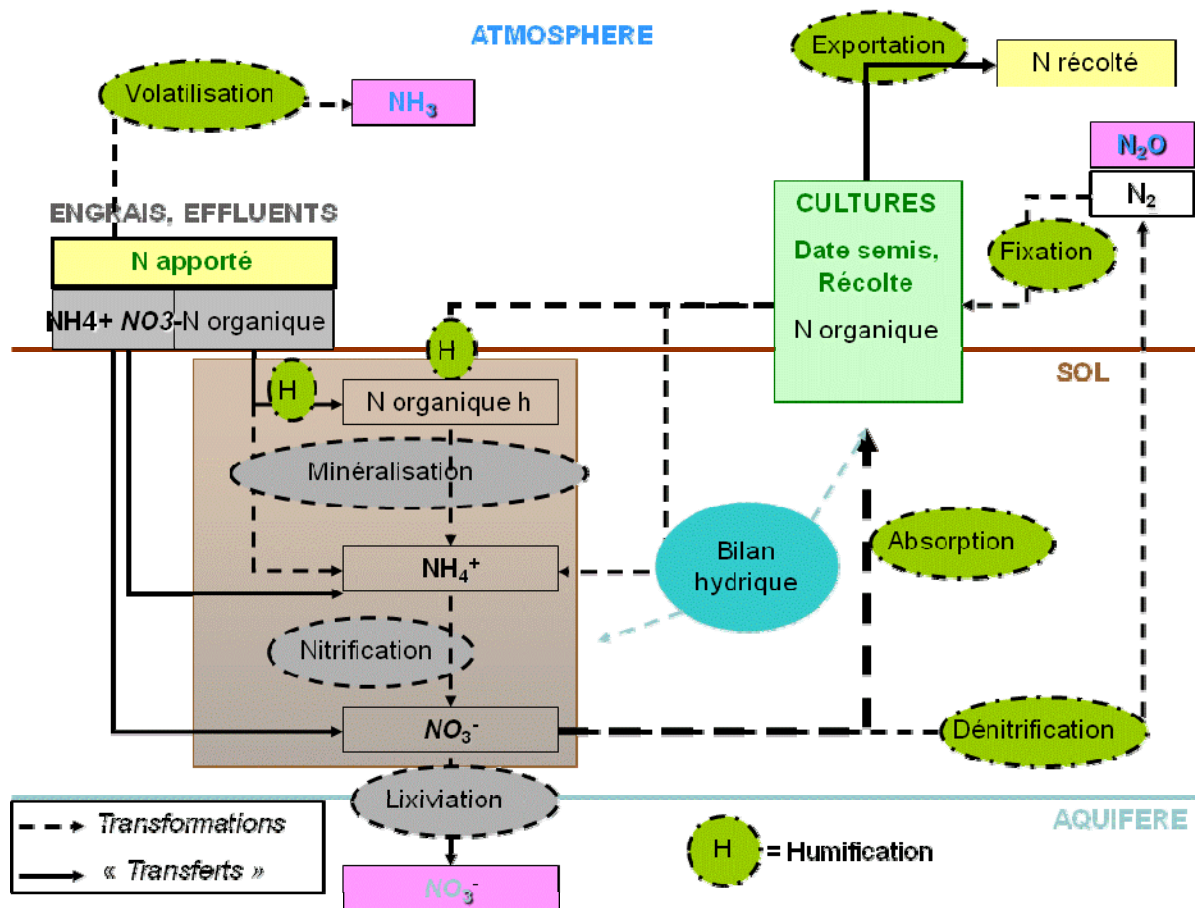


Figure 3. : Schéma du simulateur de flux d'azote dans le système sol-culture-atmosphère-eau.

Le simulateur calcule les principales pertes d'azote suivant les systèmes de culture : lixiviation de nitrate, émissions de protoxyde d'azote par dénitrification et volatilisation d'ammoniac. Il intègre des modèles existants issus de AZOFERT (Machet *et al.*, 2003) 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.*, 1998) adaptés à notre cahier des charges pour les émissions d'ammoniac 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.

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 dans 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 $N-NO_3$ 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 (N_2O et N_2) par dénitrification, ainsi qu'une estimation des émissions de N_2O 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 ($N-N_2O$) et ($N-N_2$).

Le calcul se base sur une dénitrification potentielle issue du modèle NOE (Hénault *et al.*, 2005), à laquelle sont affectés 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 N_2O issu de la dénitrification est calculé à l'aide d'un coefficient représentant le rapport $N_2O / (N_2O + N_2)$, 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 NH_3 . 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).

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 utilisateurs 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 (Aveline *et al.*, 2009). 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).

Conclusion

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 complexité suffisante pour hiérarchiser les risques d'impacts liés aux pertes. 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 des utilisateurs.

La pertinence 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.

Un premier prototype de l'outil sera présenté aux journées du Réseau Mixte Thématique Fertilisation et environnement en janvier 2012. L'objectif du projet est maintenant de compléter son paramétrage, de proposer ce prototype, 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.

Cet outil ouvre ainsi des pistes pour le renouvellement des outils de diagnostic des pertes d'azote, ainsi que de nouveaux indicateurs utilisables dans les évaluations multicritères des systèmes de culture.

Références bibliographiques

- Aveline, A., Bouthier, A., Guichard, L., Laurent, M., Minette, S., Reau, R. (2009). Des référentiels régionaux de pertes de nitrates par système de culture pour le diagnostic et le suivi évaluation des actions de restauration de la qualité des eaux. Poster, Vannes 2009.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J., Meynard, J. & 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, B. (2008). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. éditions Quæ.
- Cannavo, P. et al. (2008) Modeling N dynamics to assess environmental impacts of cropped soils. *Advances in Agronomy*, vol. 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.
- Genermont, S., et P. Cellier. (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., Nicoullaud, B., Germon, J. & Cellier, P. (2005). Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology*, 11, 115-127.
- Jeuffroy, MH, 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., Recous, S., Jeuffroy, M., 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.
- Parnaudeau, V., Reau, R., Duval, R., Fourrié, L., Gillet, J-P., Guichard, L., Justes, E., Laurent, F., Machet, J.M., Maupas, F., Morvan, T., Raynald, 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.