

RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION AZOTEE AVEC LA NOUVELLE METHODE AZOFERT

Machet Jean-Marie¹, Dubrulle Pascal¹, Damay Nathalie², Recous Sylvie³

¹ INRA, US Agro-Impact, Rue Fernand Christ, 02007 Laon Cedex France ; Jean-Marie.Machet@laon.inra.fr, Pascal.Dubrulle@laon.inra.fr; 03.23.23.99.40

² Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche, Rue Fernand Christ, 02007 Laon Cedex France ; ndamay@cg02.fr; 03.23.23.64.70

³ INRA, UMR FARE, Centre de Recherches Agronomiques, 2 Esplanade Roland Garros BP 224, 51686 Reims Cedex2 France ; Sylvie.Recous@reims.inra.fr; 03.26.77.35.83

Résumé

Une meilleure connaissance des déterminants de la minéralisation nette d'azote des matières organiques et de la dynamique de l'azote de l'engrais apporté aux cultures a conduit au projet de concevoir un nouvel outil d'aide à la décision AzoFert® permettant de calculer la fertilisation azotée d'une culture, à l'échelle de la parcelle et du cycle cultural.

Différents aspects agronomiques nouveaux ont été intégrés dans l'outil AzoFert®. Basé sur un bilan prévisionnel d'azote minéral complet, il simule au cours du temps, la fourniture d'azote par le sol et les différentes sources organiques (résidus de la culture précédente, résidus de cultures intermédiaires, produits organiques exogènes divers). Le concept de « jours normalisés » est utilisé pour intégrer, par décade, les variations de température et d'humidité. Le modèle calcule *a posteriori*, de la récolte du précédent jusqu'à l'ouverture du bilan, l'évolution des différents compartiments organiques du sol et ce, en utilisant le climat réel de l'année. Après l'ouverture du bilan, le modèle simule *a priori*, l'évolution de ces compartiments en utilisant un climat moyen (10 dernières années) et en déduit l'apport d'engrais nécessaire pour satisfaire les besoins.

Pour tenir compte des différents processus déterminant la disponibilité de l'azote des engrais, le modèle AzoFert® intègre la volatilisation d'ammoniac et l'organisation microbienne aux dépens de l'engrais.

La version actuelle du modèle couvre toutes les cultures annuelles de plein champ (céréales, cultures industrielles, cultures légumières) pour lesquelles sont connus les besoins en azote et le cycle de développement de la plante. Enfin, AzoFert® estime les impacts environnementaux comme le lessivage des nitrates, et les émissions gazeuses sous forme d'ammoniac en fonction de la dose d'apport et des formes d'azote utilisées.

Sur le plan informatique, la conception du logiciel AzoFert® lui permet de s'adapter à divers contextes pédo-climatiques et de systèmes de cultures propres aux utilisateurs. Une interface permet de gérer les différents catalogues et les tableaux de paramétrage définis dans le logiciel.

Introduction

Une meilleure connaissance des déterminants de la minéralisation nette d'azote des matières organiques et de la dynamique de l'azote de l'engrais apporté aux cultures a conduit au projet de concevoir un nouvel outil d'aide à la décision AzoFert® permettant de calculer la fertilisation azotée d'une culture, à l'échelle de la parcelle et du cycle cultural. Par ailleurs, l'évolution des pratiques culturales corollaire d'une gestion plus durable conduit, dans nos agro-systèmes, à une augmentation et une diversification des apports organiques (résidus de récolte, déchets, cultures intermédiaires, etc.) et de leurs modalités d'apport aux sols. La conception de ce nouveau modèle d'aide à la décision pour la fertilisation azotée est donc justifiée par la nécessité de disposer d'un modèle **dynamique**, permettant de prendre en compte et simuler l'effet de dates de restitutions d'apports organiques et **la diversité des sources d'azote organiques et minérales** (qualité et dynamique de minéralisation), de leur comportement et des modalités de leur gestion (applications en surface ou enfouies, liquide ou solide) et la nécessité de quantifier et rendre explicite pour le prescripteur et l'agriculteur, **les conséquences environnementales** des choix effectués en matière de fertilisation azotée, et leur proposer un conseil.

Caractéristiques agronomiques

La méthode repose toujours sur un bilan prévisionnel

La méthode AzoFert® est toujours basée sur un bilan prévisionnel d'azote minéral. C'est un bilan complet, constitué de 19 postes comptabilisant l'ensemble des entrées et sorties d'azote du système sol-plante. L'équation suivante est utilisée pour prédire la quantité d'N-engrais, exprimant que la variation du stock d'azote minéral entre l'ouverture et la fermeture du bilan est égale à la différence entre les entrées et sorties d'azote :

$$R_f - R_i = (M_n + X + A_p + F_{ns} + F_s + I_r) - (P_f - P_i + I_x + G_x + L_x + G_s + L_s)$$

Avec $M_n = M_h + M_r + M_a + M_{ci} + M_p$

R_f : N minéral dans le sol à la fermeture du bilan (à la récolte), **R_i** : N minéral dans le sol à l'ouverture du bilan (fin de l'hiver pour les cultures d'automne, semis pour les cultures de printemps), **M_n** : minéralisation nette de l'humus (**M_h**), des résidus de cultures (**M_r**), des produits organiques (**M_a**), des cultures intermédiaires (**M_{ci}**) et des résidus prairiaux (**M_p**), **X** : quantité de N-engrais, **A_p** : apport N par les pluies, **F_{ns}** : fixation non symbiotique, **F_s** : fixation symbiotique, **I_r** : apport N par irrigation, **P_f** : prélèvement total N par la culture à la fermeture du bilan, **P_i** : prélèvement N par la culture à l'ouverture du bilan, **I_x** : N-engrais organisé, **G_x** : N-engrais perdu par voie gazeuse (volatilisation), **L_x** : N-engrais perdu par lixiviation, **G_s** : N minéral du sol perdu par voie gazeuse (dénitrification), **L_s** : N minéral du sol perdu par lixiviation entre l'ouverture et la fermeture du bilan.

On suppose que la fixation non symbiotique (F_{ns}) compense les pertes d'N minéral du sol par dénitrification (G_s) et que la lixiviation de N-engrais est nulle.

Approche dynamique de la fourniture en azote

La fourniture d'azote par le sol et les différentes sources organiques (résidus de la culture précédente, résidus de cultures intermédiaires, produits organiques exogènes divers) est simulée au cours du temps. Le concept de « temps normalisé » est utilisé pour intégrer les variations de température et d'humidité. Il s'agit de convertir des jours à température et humidité variables en jours à une température de référence et à une humidité optimale ou « jours normalisés », un jour à la température et humidité de référence prenant alors la valeur 1. Le facteur climatique d'un jour donné est alors la valeur prise par ce jour. Dans la méthode AzoFert, la température de référence est 15°C et l'humidité de référence est l'humidité à la capacité au champ ; la température moyenne, la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle sont intégrées sur le pas de temps de la décade. Chaque parcelle agricole est rattachée à un poste climatique.

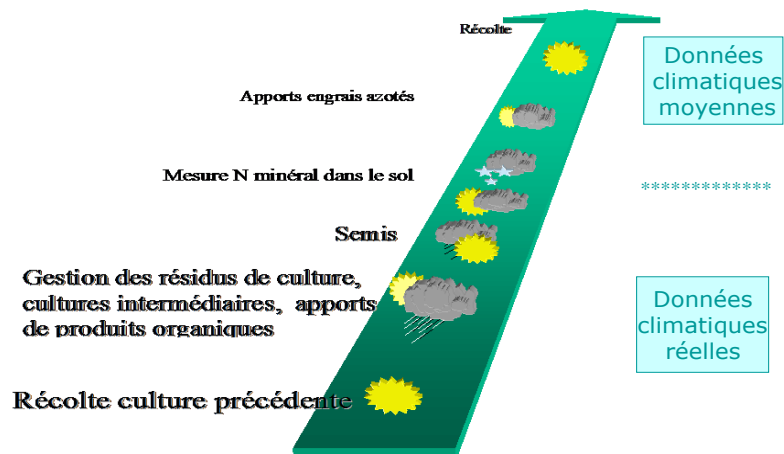


Figure 1 : Prise en compte des dates et des techniques culturales pour l'approche dynamique de la fourniture en azote par le sol

Le modèle calcule *a posteriori*, de la récolte du précédent jusqu'à l'ouverture du bilan, l'évolution des différents compartiments organiques du sol et ce, en utilisant le climat réel de l'année. Après l'ouverture du bilan, le modèle simule *a priori*, l'évolution des différentes sources organiques et la minéralisation nette de la matière organique humifiée en utilisant un climat moyen (10, 20, 30 dernières années selon l'antériorité de la station météorologique) et en déduit l'apport d'engrais nécessaire pour satisfaire les besoins (Figure 1).

Décomposition des matières organiques

AzoFert® comprend un nouveau module pour évaluer la minéralisation de l'azote du sol et des matières organiques apportées. La minéralisation nette de l'azote est la somme de la minéralisation de la matière organique humifiée et de la contribution des différentes sources organiques. La matière organique humifiée est minéralisée dans les couches supérieures du sol. Le taux de minéralisation de ces couches est fonction d'un taux potentiel dépendant du pool d'azote organique humifié et de la texture du sol (taux d'argile et de calcaire) et de la température et de l'humidité du sol (Mary *et al.*, 1999). Le taux de minéralisation intègre également les effets des techniques culturales liées à la politique de restitutions organiques appliquée à la parcelle (apports et types de produits organiques, fréquence et espèces de cultures intermédiaires).

La décomposition des résidus de culture et des produits organiques entraîne de la minéralisation nette ou de l'organisation nette de l'azote dans le sol (Figure 2). Chaque résidu de culture et produit organique est caractérisé par une cinétique de décomposition spécifique, relative au carbone et à l'azote. La décomposition de ces produits est fonction de la nature des résidus organiques (caractéristiques chimiques et rapport C/N) et de la température et de l'humidité du sol (Nicolardot *et al.*, 2001).

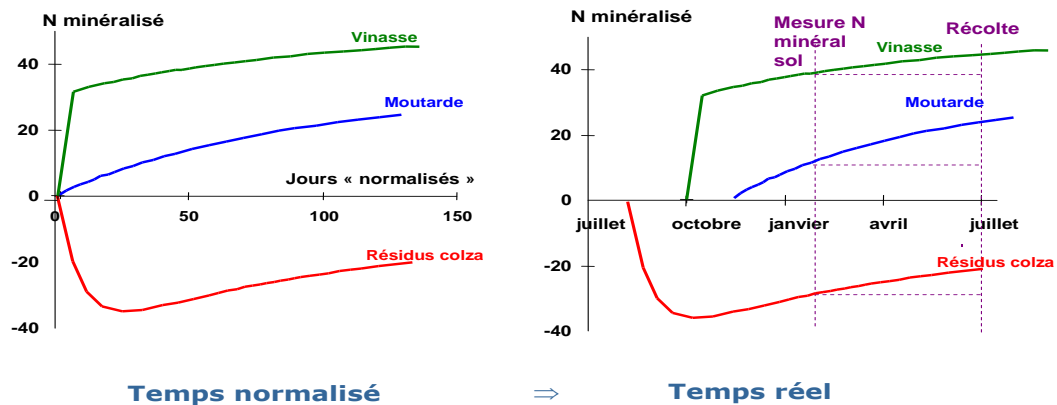


Figure 2 : Décomposition des différentes sources organiques

Processus déterminant la disponibilité de l'azote des engrais

Le modèle estime la volatilisation d'ammoniac et l'organisation microbienne aux dépens de l'engrais. Les expérimentations de fertilisation, utilisant l'isotope ^{15}N , sur différentes cultures dans le climat tempéré du Nord-Ouest de l'Europe ont montré que l'organisation de l'azote par la microflore hétérotrophe du sol et les pertes gazeuses sont en compétition avec l'absorption par la plante pour l'azote de l'engrais (Recous *et al.*, 1997). La volatilisation d'ammoniac est estimée par un modèle simple prenant en compte des caractéristiques du sol (pH, capacité d'échange cationique), la forme

de l'engrais (physique et chimique), le mode d'apport (en surface du sol ou dans le sol) et le développement de la culture à la date d'apport de l'engrais. La quantité d'azote organisé de l'engrais est déterminée à partir de la disponibilité en carbone (carbone venant de la rhizodéposition, des résidus de culture et des produits organiques) et d'un rapport d'organisation (N organisé / C décomposé) qui varie avec la disponibilité en azote (Mary *et al.*, 1996).

Cultures concernées

La version actuelle du logiciel fournit une prévision de la fertilisation azotée pour 40 cultures annuelles de plein champ : céréales (céréales d'hiver et de printemps, maïs), cultures industrielles (colza, betterave à sucre, lin) et cultures légumières de plein champ (pommes de terre, carottes, oignons, haricots, endives, épinards,...), pour lesquelles les besoins en azote et le cycle de développement sont connus. Pour certaines espèces comme les pommes de terre, les données intégrant la longueur du cycle de la culture et l'objectif de production permettent d'évaluer les besoins en azote autrement que par des valeurs forfaitaires (Chambenoit *et al.*, 2002).

Enfin, AzoFert® estime les impacts environnementaux comme le lessivage des nitrates, et les émissions gazeuses sous forme d'ammoniac en fonction de la dose d'apport et des formes d'azote utilisées.

Caractéristiques informatiques et fonctionnement

Le logiciel AzoFert® est développé en Visual Basic et fonctionne sous les environnements Windows 9X et XP (Dubrulle *et al.*, 2003). Les utilisateurs peuvent modifier facilement les paramètres pour les adapter à des situations culturales et des contextes pédoclimatiques variés en utilisant une interface de paramétrage qui gère différents catalogues (sols, cultures, produits organiques, résidus de culture,...) et des tableaux. De ce fait, l'utilisateur devient responsable des prescriptions qu'il fournit à ses clients.

Le logiciel est conçu pour être intégré facilement dans le système de gestion de données d'un laboratoire d'analyses de sols en utilisant des fichiers d'entrées / sorties (Figure 3). Le système élabore un fichier d'entrée pour AzoFert et lit un fichier de sortie à partir d'AzoFert dans le but de créer un bulletin de résultats comprenant l'interprétation et les recommandations de fertilisation azotée.

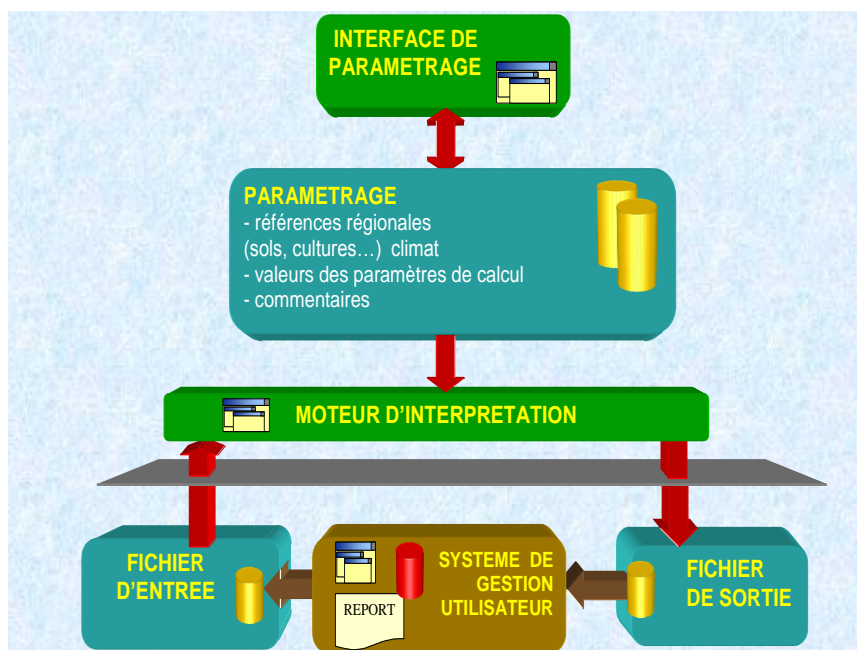


Figure 3 : Schéma d'organisation d'AzoFert®

Un outil d'aide à la décision ne sera pleinement utilisé sur le terrain que s'il comporte un nombre limité de variables d'entrée, des variables faciles à acquérir et s'il présente une bonne convivialité. Ceci constitue un challenge dans l'élaboration d'un tel outil. Les données d'entrée permettant l'élaboration du fichier d'entrée sont constituées des résultats du laboratoire et de renseignements à partir d'un questionnaire rempli par l'agriculteur. Les renseignements relatifs à la parcelle concernent les caractéristiques de sols, le précédent cultural, les apports organiques et cultures intermédiaires le cas échéant, et des informations sur la culture à fertiliser. Les données de sortie sont éditées sur un bulletin de 4 pages. La dernière page montre le plan de fumure prévisionnel, qui reprend l'ensemble des postes du bilan d'azote minéral pour le calcul de la dose d'engrais.

Conclusions

L'Institut Technique de la Betterave (ITB) a testé la méthode AzoFert, dans les grandes régions françaises de production. Pour la betterave à sucre, plus de 60% des parcelles sont échantillonnées à la fin de l'hiver pour mesurer la quantité d'azote minéral dans le sol avant le calcul de la dose d'azote par la méthode du bilan prévisionnel. Cette validation a été réalisée sur la base de références expérimentales regroupées dans une base de données portant sur 9 années d'essais azote (Duval et Machet, 2008). Chaque essai comporte une courbe de réponse avec 4 à 6 doses d'azote (incluant toujours un traitement témoin sans azote). La dose calculée par AzoFert® est située sur la courbe de réponse et comparée à l'optimum, qui correspond à la dose d'azote permettant d'atteindre le rendement maximal de sucre. Le travail de validation réalisé par l'ITB montre que le gain de précision dans la prise en compte de chaque poste du bilan conduit à améliorer la qualité des conseils de fertilisation, que le nombre de cas de surfertilisation diminue significativement et qu'AzoFert® intègre la variabilité agro-pédo-climatique de chaque situation agricole. Par ailleurs, des mesures faites par le Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche de l'Aisne sur des cultures de blé d'hiver, orge d'hiver et de printemps, betteraves sucrières montrent une bonne relation entre l'azote absorbé par des cultures non fertilisées (témoins 0N) et les fournitures d'azote par le sol estimées par AzoFert®.

Pour les régions agricoles (Nord de la France, grand Bassin Parisien, Centre), l'utilisation d'un outil avec des « modèles dynamiques » permet une meilleure estimation des fournitures en azote du sol. L'intégration des données réelles caractérisant le climat, le type de sol, la situation et les pratiques culturales, ...liées à une parcelle agricole conduit à une amélioration significative de la précision des conseils de fertilisation azotée. En 2008, 38 000 parcelles agricoles ont été interprétées en France, toutes cultures confondues, avec la méthode AzoFert.

Références bibliographiques

- CHAMBENOIT, C., *et al.*, 2002, *Fertilisation azotée de la pomme de terre*, Guide pratique Editions Agro-Transfert, Inra, Itcf/Itpt, 128 p.
- DUBRULLE, P., MACHET, J.M., DAMAY, N., 2003, Azofert: a new decision support tool for fertiliser N recommendations, in : *Controlling nitrogen flows and losses, 12th Nitrogen Workshop*, Exeter, Devon, UK, p. 500-501
- DUVAL, R., MACHET, J.M., 2008, Field N recommendation: validation of a new software, AzoFert®, Proceedings of 71st IIRB Congress, Brussels, 14 p.
- MARY, B., *et al.*, 1996, Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil, *Plant and Soil*, n° 181, p. 71-82.
- MARY, B., *et al.*, 1999, Calculation of nitrogen mineralisation and leaching in fallow soil using a simple dynamic model, *European Journal of Soil Science*, n° 50, p. 549-566.
- NICOLARDOT, B., RECOUS, S., MARY, B., 2001, Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*, n° 228, p. 83-103.
- RECOUS, S., *et al.*, 1997, Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In : *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Editions G. Lemaire et B. Nicolardot, Les colloques de l'INRA, n° 83, p. 105-120.