

Perspectives d'amélioration du conseil prévisionnel de fertilisation azotée à la parcelle en Wallonie par l'utilisation du logiciel AzoFert®

Morgan Abras, Jean-Pierre Goffart, Jean-Pierre Destain

Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W). Département Productions et filières. Unité Stratégies phytotechniques. Rue du Bordia, 4. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : m.abras@cra.wallonie.be

Le logiciel de conseil de fertilisation azotée AzoFert® est actuellement en phase d'adaptation et de validation aux conditions pédoclimatiques de la Wallonie par le CRA-W (Centre wallon de Recherches agronomiques) dans le cadre du projet INTERREG IV « SUN » (*Sustainable Use of Nitrogen*). Cette adaptation a demandé la modification de valeurs des tableaux de paramétrage et catalogues relatifs à l'effet prairie, aux restitutions organiques, aux politiques de cultures intermédiaires, aux cultures, aux produits organiques et aux types de sol. Les données de 25 essais de fumure azotée croissante réalisés par le CRA-W entre 1996 et 2011 en culture de céréales, pomme de terre et légumes et implantées sur des sols limoneux et sablo-limoneux ont été valorisés afin de valider le logiciel AzoFert® adapté pour la Wallonie. L'écart observé entre les doses d'azote conseillées par AzoFert® et Azobil® (logiciel actuellement utilisé dans le laboratoire de référence Chaîne Nitrate [Requasud] du CRA-W) et la dose optimale en azote de chaque essai montre qu'AzoFert® donne dans la plupart des cas un conseil plus proche de l'optimum que ne le faisait Azobil®. L'absorption de l'azote mesurée dans les plantes prélevées dans une parcelle témoin non fertilisée montre par ailleurs une corrélation plus étroite avec les fournitures en azote par le sol estimées par AzoFert® qu'avec celles estimées par Azobil®. Cette meilleure estimation de la minéralisation des différentes sources organiques, probablement en lien avec l'approche dynamique des fournitures en azote du sol, intégrée au logiciel AzoFert®, peut expliquer le gain de précision constaté dans le conseil AzoFert® par rapport à celui d'Azobil®.

Mots-clés. Azote, fertilisation, système d'aide à la décision, Belgique.

Prospects for improving the provisional nitrogen fertilization recommendation at field scale in Wallonia using the AzoFert® software. The French software AzoFert® for nitrogen fertilization recommendation is currently under adaptation and validation for soil and climatic conditions in Wallonia by the CRA-W within the INTERREG IV project "SUN" (Sustainable Use of Nitrogen). This adaptation has raised the need for a change of values in the parameter tables and catalogs relating to meadow residues, crop residues, catch crop practices, crops, organic amendments and soil type. Data from 25 trials of increasing nitrogen fertilizer rates conducted by CRA-W between 1996 and 2011 in cereal, potato and vegetable crops located on loam and sandy loam soil were used to validate the AzoFert® software adapted for Wallonia. The difference between nitrogen rates recommended on the one hand by AzoFert® or Azobil® (software currently used in the reference lab for Nitrate [Requasud] at CRA-W) and the optimal dose of nitrogen fertilizer assessed in each trial on the other hand shows that, in most cases, AzoFert® gives a recommendation closer to the optimum than Azobil®. The nitrogen uptake measured in the plants collected in the unfertilized control plot also shows a higher correlation with nitrogen supply from the soil assessed by AzoFert® than for plants assessed by Azobil®. The more accurate estimate of the mineralization of organic sources, probably linked to the dynamic soil nitrogen supply approach integrated into AzoFert®, may explain the gain in the greater accuracy of the AzoFert® recommendation in comparison with that of Azobil®.

Keywords. Nitrogen, fertilization, decision support tool, Belgium.

1. INTRODUCTION

Le conseil de fertilisation azotée du laboratoire de référence de la Chaîne Nitrate en Wallonie (CRA-W, Département Agriculture et milieu naturel, Unité Fertilité des sols et protection des eaux) est basé sur

le bilan prévisionnel d'azote à la parcelle et sur le logiciel Azobil® développé par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA, Laon, France) et adapté au cours des années 1990 et au début des années 2000 pour la Wallonie. Ce logiciel a fait ses preuves en Wallonie où il est utilisé principalement en

grandes cultures, mais comporte néanmoins plusieurs hypothèses de simplification. Un bilan prévisionnel statique pour calculer les doses d'engrais azotés appliquées aux cultures annuelles (Meynard et al., 1997), basé uniquement sur la température moyenne annuelle, constitue la base du modèle Azobil® (Machet et al., 1990). Une incertitude due à l'étroite relation qui relie température et minéralisation persiste donc dans le calcul du conseil Azobil® (Frankinet et al., 2001). L'amélioration des connaissances de la dynamique de la minéralisation nette de l'azote des matières organiques et de l'azote des engrais apportés aux cultures ont permis de développer une approche dynamique de la méthode du bilan, intégrée à la version ultérieure du logiciel, appelée « AzoFert® ». L'adaptation du logiciel AzoFert® en Wallonie est actuellement en cours au CRA-W, avec l'appui des concepteurs d'AzoFert®, dans le cadre du projet INTERREG IV « SUN » (*Sustainable Use of Nitrogen*).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Les essais agronomiques valorisés et la détermination de la fumure azotée optimale

Le logiciel de conseil de fumure azotée à la parcelle AzoFert® a été testé sur base de données de 25 essais agronomiques réalisés en Wallonie par le CRA-W de 1996 à 2011 en cultures de froment, escourgeon, betterave, pomme de terre et légumes (haricot, épinard, scarole, carotte) et dont les caractéristiques principales

sont décrites dans le **tableau 1**. On peut considérer, à la vue de ce tableau, que l'on couvre déjà une palette assez large de situations agronomiques et pédologiques pour la Wallonie. Les essais comprenant des apports d'engrais de ferme sont cependant rares en raison de la volonté de les implanter sur des terres exemptes d'apports organiques afin de gérer le plus précisément possible les apports d'azote sous forme d'engrais minéraux. Ces essais disposés en blocs aléatoires complets avec quatre répétitions comprennent entre quatre et six traitements de doses croissantes d'engrais azoté minéral, dont un traitement témoin sans azote minéral de synthèse.

Pour chaque essai, les conseils de fumure ont été établis avec les logiciels Azobil® (Machet et al., 1990) et AzoFert® (Dubrulle et al., 2004) mis au point par l'INRA (Station Agronomique de l'Aisnes, Laon, France). De plus, la dose optimale de fumure azotée a été déterminée sur base de l'ajustement d'une courbe quadratique (polynomiale du second degré) par rapport aux points de rendements physiques obtenus pour chaque niveau de fumure azotée. L'optimum de la courbe a été déterminé en considérant la dose de fumure azotée menant au rendement le plus élevé, c'est-à-dire la valeur de l'abscisse qui annule la dérivée première de l'équation de régression de la courbe de réponse à l'azote. Cette dose optimale en azote a cependant été revue à la baisse dans certains cas afin de remplir d'éventuels critères qualitatifs (% de matière sèche pour les céréales et les pommes de terre, et taux de nitrate pour les légumes) ou un excès d'azote minéral dans le sol après la récolte.

Tableau 1. Principales caractéristiques des 25 essais agronomiques dont les données ont été valorisées pour la validation d'AzoFert® en Wallonie — *Main characteristics of 25 agronomic trials whose data were used for the validation of AzoFert® in Wallonia.*

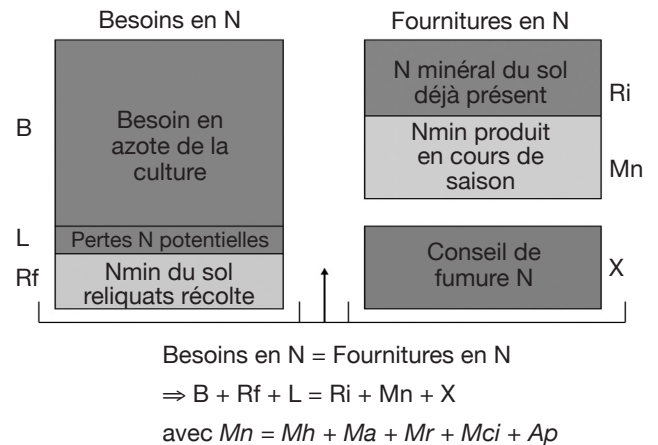
Nombre d'essais par

Année	Type de sol	Culture	Culture précédente	Amendement organique	CIPAN
1996 : 4	Limoneux (Aba) : 19	Pomme de terre : 8	Froment : 11	Fientes de volailles : 1	Moutarde : 6
1997 : 2	Limoneux (Ada) : 4	Froment : 4	Betterave : 4	Fumier de volailles : 1	Seigle : 2
1998 : 2	Limono-sableux (Lda) : 1	Carotte : 5	Scarole : 2	Aucun : 23	Ray-grass : 1
2002 : 2	Sablo-limoneux (Sba) : 1	Scarole : 4	Avoine : 1		Aucun : 16
2003 : 1		Escourgeon : 1	Orge de printemps : 1		
2005 : 3		Épinard : 3	Pomme de terre : 1		
2006 : 3			Maïs fourrager : 1		
2007 : 4			Carotte : 1		
2008 : 1			Haricot : 1		
2010 : 2			Épinard : 1		
2011 : 1			Oignon : 1		

2.2. Établissement du conseil prévisionnel de fertilisation azotée à la parcelle à l'aide du logiciel Azobil®

Le logiciel Azobil® est basé sur le bilan prévisionnel d'azote à la parcelle (Figure 1). Dans cette méthode, on pose les hypothèses que les coefficients d'utilisation de l'azote sont de 100 % et que les pertes en azote par volatilisation ou par dénitrification sont compensées par les apports en azote suite aux précipitations et à la fixation non symbiotique. De plus, les différents termes du bilan sont considérés comme additifs sans interaction entre eux. L'établissement de ce bilan nécessite l'acquisition d'un ensemble de données spécifiques à la parcelle. Ces informations portent sur les caractéristiques de sol (texture du sol, teneur en carbone, teneur en azote minéral du profil en début de culture dans la couche limitée à la profondeur maximale d'enracinement) et sur l'historique phytotechnique de la parcelle (culture précédente, effet prairie, devenir des résidus de récolte, fréquence d'apport des amendements organiques, CIPAN) qui entrent en ligne de compte pour l'estimation des fournitures en azote minéral du sol.

Les besoins en azote (B) sont définis différemment selon les espèces considérées. Les cultures récoltées en grains ont des besoins déterminés par unité de production (quintal de grains pour les céréales, tonne de matière sèche pour le lin fibre ou le maïs fourrage) et pour lesquelles un objectif de rendement est défini *a priori*, tandis que pour les cultures récoltées en phase végétative (par exemple betterave, pomme de terre, maïs), les besoins azotés sont considérés de manière forfaitaire. Les besoins sont établis de manière à fournir le rendement potentiel maximum de la culture dans les conditions optimales de croissance et de développement. Ce sont donc des besoins d'assurance. Les réserves du sol en azote minéral (nitrate et ammoniacque) à l'ouverture du bilan (Ri) sont mesurées par analyse d'échantillons de sol prélevés sur un profil dont la profondeur est au moins égale à la profondeur probable d'enracinement de la culture. L'ouverture du bilan correspond au prélèvement des échantillons de sol qui doit être effectué dans le laps de temps le plus court possible avant l'apport d'engrais azotés. Les reliquats en azote à la récolte (Rf, fermeture du bilan) sont estimés à un niveau le plus faible possible. Pour l'établissement du conseil de fumure azotée des différentes cultures, on ne considère que l'azote minéral présent à l'ouverture du bilan (Ri) dans la couche correspondant à la profondeur probable d'enracinement de la culture concernée. Les autres postes du bilan (Mn, minéralisation nette pendant la culture ; P, pertes éventuelles) sont estimés par le logiciel sur base d'algorithmes à partir des informations fournies par les agriculteurs et, pour la minéralisation



Mn : minéralisation nette de l'humus (Mh), des résidus de culture (Mr), des amendements organiques (Ma), des cultures intermédiaires (Mci) et de l'arrière effet prairie (Ap).

Figure 1. Schéma des postes du bilan azoté prévisionnel à la parcelle répartis en besoins et fournitures en azote — *Diagram of provisional nitrogen balance sheet at field scale divided into nitrogen needs and supplies.*

nette, de la température moyenne annuelle et du coefficient d'occupation du sol (COS) qui représente le temps durant lequel la culture reste en place.

2.3. Établissement du conseil prévisionnel de fertilisation azotée à la parcelle à l'aide du logiciel AzoFert®

En plus de se baser sur un bilan prévisionnel complet en azote minéral afin de prendre en compte l'organisation microbienne, les pertes gazeuses ainsi que le devenir des engrais azotés, AzoFert® intègre une simulation dynamique des fournitures en azote par le sol (Machet et al., 2007). Sur base des deux hypothèses suivantes, le lessivage de l'azote de l'engrais est nul sous culture et les pertes gazeuses par l'azote minéral du sol sont compensées par les apports d'azote par la fixation non symbiotique, l'équation du bilan prévisionnel dans AzoFert® s'écrit de la manière suivante :

$$Rf - Ri = (Mn + X + Ap + Fs + Ir) - (Pf - Pi + Ix + Gx + Ls)$$

avec $Mn = Mh + Mr + Ma + Mci + Mp$, Rf : N minéral du sol à la fermeture du bilan, Ri : N minéral du sol à l'ouverture du bilan, Mn : minéralisation nette de l'humus (Mh), des résidus de culture (Mr), des amendements organiques (Ma), des cultures intermédiaires (Mci) et de l'arrière effet prairie (Mp), X : conseil de fertilisation azotée, Ap : N apporté par les précipitations, Fns : fixation non symbiotique, Fs : fixation symbiotique, Ir : N apporté par l'irrigation, Pf : N absorbé par la culture à la fermeture du bilan,

Pi : N absorbé par la culture à l'ouverture du bilan, Ix : organisation microbienne liée à l'apport d'engrais, Gx : pertes gazeuses liées à l'apport d'engrais, Lx : lessivage de l'azote de l'engrais, Gs : pertes gazeuses liées à l'N minéral du sol, Ls : lessivage de l'N minéral du sol.

Pour le calcul du conseil AzoFert®, la quantité d'azote minéral dans une couche de sol correspondant à la profondeur maximale d'enracinement de la culture étudiée est mesurée à l'ouverture du bilan (à la fin de l'hiver pour les cultures d'hiver et au semis pour les cultures de printemps). Afin de prendre en compte les contributions des résidus de la culture précédente (Mr), des cultures intermédiaires (Mci) et des amendements organiques (Ma) appliqués avant la mesure de l'azote minéral du sol, la décomposition de ces différentes sources d'azote est simulée de la récolte de la culture précédente à l'ouverture du bilan en utilisant des données climatiques réelles. De l'ouverture à la fermeture du bilan, les contributions nettes ultérieures des résidus organiques et la minéralisation nette de l'humus (Mh) sont estimées sur base des données climatiques moyennes des 15 dernières années. AzoFert® se base sur des données climatiques décennales afin de réaliser ces simulations et nécessite donc, en plus des renseignements déjà demandés pour Azobil®, des informations précises concernant les dates de récolte de la culture précédente, d'apports de matières organiques, de labour, de prélèvement de sol, d'implantation et de destruction des cultures intermédiaires et d'implantation de la culture à fertiliser, ainsi qu'une date probable de récolte.

Les données climatiques suivantes, nécessaires à l'utilisation du logiciel AzoFert®, ont été obtenues auprès de l'asbl PAMESEB, un réseau de 30 stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire wallon : température, précipitations, rayonnement global et évapotranspiration potentielle. Ces données, sous format horaire, ont été synthétisées au format décennaire afin de correspondre aux exigences d'AzoFert®. Pour chaque essai, un fichier « climat » a été créé sur base des données de la station météorologique la plus proche de la parcelle. Ce fichier « climat » reprend les données climatiques réelles à partir du début de l'année précédant la culture à fertiliser jusqu'à l'ouverture du bilan et les données moyennes des 15 années précédant celle de l'implantation de la culture à fertiliser à partir de l'ouverture du bilan jusqu'à la fin de l'année.

Afin de les faire correspondre aux spécificités de la Wallonie, les tableaux de paramétrage et catalogues suivants du logiciel AzoFert® ont subi des modifications : « effet prairie », « restitutions organiques », « cultures », « produits organiques » et « types de sol ». Les changements qui avaient été opérés dans le paramétrage du logiciel Azobil® lors de

son adaptation en Wallonie et pour lesquels AzoFert® dispose des mêmes tableaux de paramétrage ont été transposés au logiciel. Les valeurs de la composition en azote des principaux engrais de ferme utilisés en Wallonie ont été substituées à celles initialement renseignées. Enfin, le catalogue « types de sol » a été entièrement remanié afin de correspondre aux caractéristiques des principaux types de sol présents en Wallonie. Les valeurs de la plupart des paramètres de ces types de sol sont issues de la base de données Aardewerk, elle-même issue de la numérisation de la carte pédologique de Belgique (Van Orshoven et al., 1993). Les valeurs des paramètres suivants des types de sol qui n'ont pu être trouvées dans la base de données Aardewerk ont été établies en collaboration avec le personnel de l'INRA et du Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherches de Laon (Aisne, France) : coefficient de contribution de la couche de surface à l'évapotranspiration, coefficient de profondeur de la couche minéralisante, fraction active de l'azote organique, valeur seuil de NH₄ de la couche de surface, concentration minimale en azote du sol et seuil de prise en compte de l'azote total. Les valeurs de certains paramètres des types de sol (principalement teneur en azote total et humidité du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement) ont par la suite été affinées sur base des données d'essais utilisés pour la validation du logiciel AzoFert®.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Comparaison du conseil de fertilisation donné par AzoFert® et Azobil® sur base de la dose optimale évaluée dans des essais agronomiques réalisés par le CRA-W en Wallonie de 1996 à 2011

La totalité des essais réalisés avant 2010 avaient déjà fait l'objet d'un calcul du conseil Azobil®. Pour les trois essais réalisés en 2010 et 2011, le conseil Azobil® a été calculé lors de leur mise en place. Les conseils AzoFert® ont été calculés pour les 25 essais. La différence entre les doses conseils (Azobil® et AzoFert®) et la dose optimale a ensuite été calculée puis répartie en classes d'intervalles de 30 kg N·ha⁻¹. La **figure 2** montre la distribution des essais dans chaque classe d'intervalles.

Sur base des résultats issus des essais qui ont servi à réaliser cette étude, on peut affirmer qu'AzoFert® mène à une amélioration de la précision du conseil de fertilisation azotée à la parcelle. Par rapport à Azobil®, un plus grand nombre d'essais se trouvent en effet dans les classes adjacentes à la dose optimale (classes -30/0 et 0/30, regroupant les essais pour lesquels le conseil est éloigné de moins de 30 kg N·ha⁻¹ de la dose optimale), avec 80 % pour AzoFert® contre 57 % pour Azobil®.

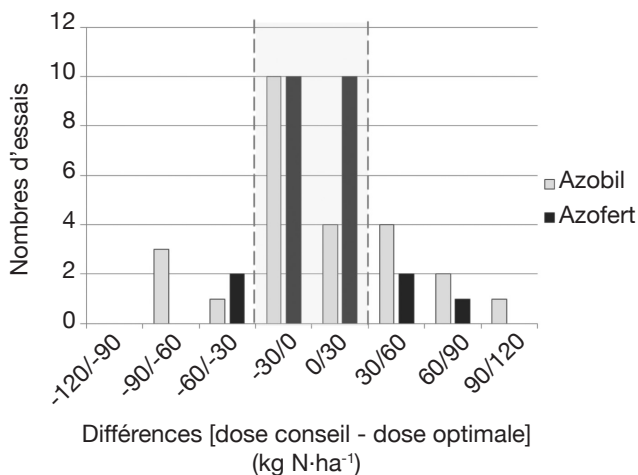


Figure 2. Répartition des 25 essais en fonction des conseils de fertilisation donnés par Azobil® et AzoFert® cadrés par rapport à la dose optimale expérimentale — *Distribution of the 25 trials based on the fertilization recommendations given by Azobil® and AzoFert® in relation to the nitrogen optimal rate.*

Les figures 3a et 3b reprennent les mêmes données réparties selon le type de culture. À la figure 3a, on remarque une répartition des cultures relativement marquée avec le conseil Azobil® largement surestimé en culture de carotte et fréquemment sous-estimé en culture de pomme de terre. Les autres cultures bénéficient le plus souvent d'un conseil Azobil® assez proche de l'optimum (à une exception près en culture de céréales).

Dans le cas d'AzoFert® (Figure 3b), on observe également une surestimation du conseil en culture de carotte, bien que dans une moindre mesure qu'avec le logiciel Azobil®. Cette surfertilisation en culture de

carotte a déjà été constatée par Fonder et al. en 2010. Pour les autres cultures (pomme de terre, épinard, céréales), on observe assez nettement un meilleur centrage du conseil AzoFert® autour de la dose optimale. L'explication de ces améliorations semble provenir d'une meilleure estimation de la minéralisation des différentes sources organiques d'azote (humus du sol, résidus de culture, apports d'engrais de ferme), comme l'illustrent les résultats décrits au point suivant.

3.2. Validation du poste « Minéralisation nette des sources organiques » d'AzoFert® et comparaison avec Azobil®

Dans le but de valider les nouvelles valeurs des paramètres des types de sol *via* le poste minéralisation des deux logiciels, les fournitures en azote par le sol estimées par les logiciels Azobil® et AzoFert® ont été comparées à l'absorption d'azote mesurée dans les plantes prélevées au sein des traitements témoins non fertilisés. Cette comparaison a été effectuée sur huit essais réalisés en légumes (haricot, épinard, carotte) en sols limoneux. La figure 4 montre les corrélations qui existent entre ces valeurs pour l'estimation faite par Azobil® et AzoFert®. Le coefficient de détermination r^2 montre une corrélation plus forte entre l'absorption d'azote par le témoin 0 et l'estimation des fournitures du sol en N réalisée par AzoFert® que celle faite par Azobil®. Même si ce r^2 est déjà élevé pour Azobil®, il montre une plus grande précision de l'estimation des fournitures en azote du sol par AzoFert®. Cette analyse doit cependant être complétée avec des essais réalisés sur un panel plus varié de cultures et implantés dans des sols plus diversifiés et devrait permettre d'expliquer en partie le gain de précision du conseil de fertilisation azotée fourni par AzoFert®.

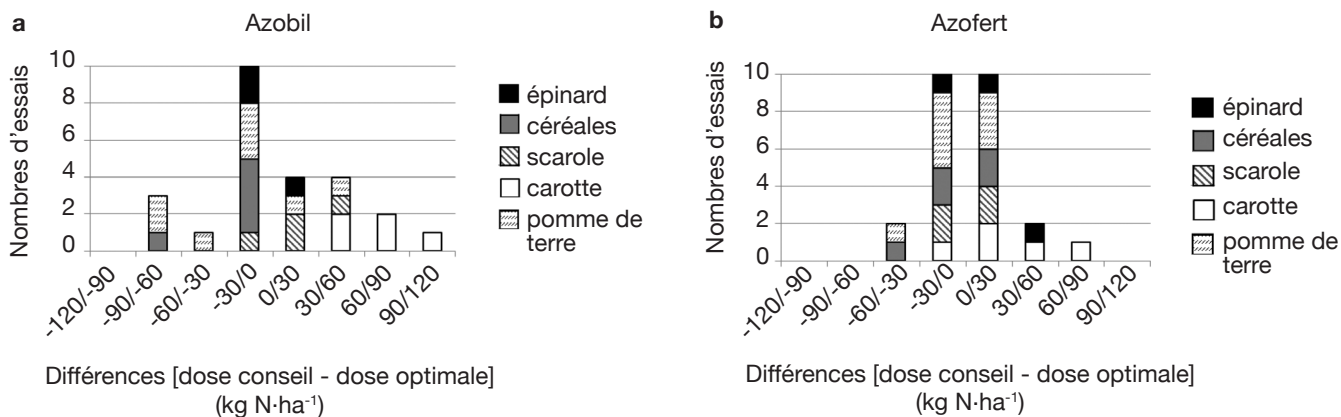


Figure 3. Répartition du conseil Azobil® (a) et AzoFert® (b) autour de la dose optimale par type de culture — *Azobil® (a) and AzoFert® (b) recommendation distribution around the nitrogen optimal rate for each crop.*

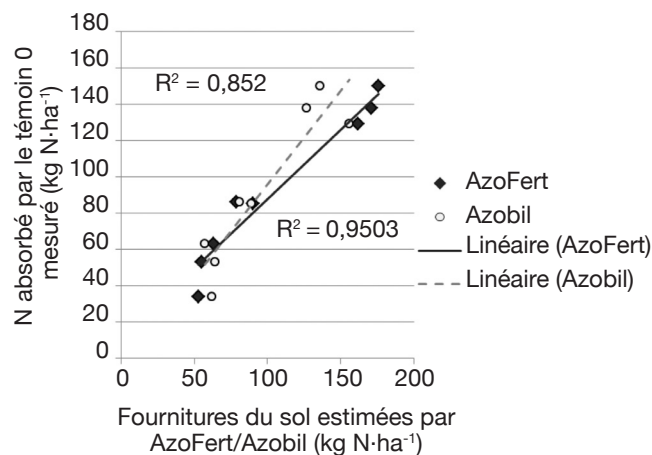


Figure 4. Corrélation entre l'azote absorbé par les plantes mesuré dans une zone non fertilisée de la parcelle et les fournitures du sol en azote estimées par les logiciels Azobil® et AzoFert® — *Correlation between nitrogen absorbed by plants measured in a non-fertilized plot and soil nitrogen supply assessed by Azobil® and AzoFert® software.*

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au vu des résultats obtenus, le logiciel AzoFert® amène un gain de précision par rapport à Azobil®. D'une part, les doses conseillées par AzoFert® sont fréquemment plus proches de la dose optimale que celles données par Azobil® et d'autre part, l'estimation des fournitures en azote par le sol sont estimées plus précisément par AzoFert®, probablement en relation avec la simulation dynamique de ces fournitures. Ces premiers résultats sont prometteurs et permettent d'envisager une utilisation future d'AzoFert® par les laboratoires du réseau RequaSud en Wallonie. Il est auparavant nécessaire d'obtenir des données d'essais supplémentaires qui permettront d'étendre la validation du logiciel AzoFert® à une gamme plus étendue de cultures, implantées sur des sols variés (particulièrement les sols sableux et argileux) et dont la fréquence d'apports et la quantité de matière organique seraient plus élevées.

Bibliographie

Dubrulle P., Machet J.M. & Damay N., 2004. AzoFert®: a new decision support tool for fertiliser

N recommendations. In: Hatch D.J., Chadwick D.R., Jarvis S.C. & Roker J.A., eds. *Proceedings of the 12th Nitrogen Workshop, Controlling nitrogen flows and losses, 21st - 24th September 2003, Exeter, Devon, UK.* Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 500-501.

Fonder N., Heens B. & Xanthoulis D., 2010. Optimisation de la fertilisation azotée de cultures industrielles légumières sous irrigation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **14**(S1), 103-111.

Frankinet M., Renard S., Dautrebande S. & Casse C., 2001. *Appui scientifique à la recherche prénormative dans le secteur alimentaire dans un contexte de développement durable. Gestion intégrée de l'azote en cultures arables et normes nitriques. Rapport d'activités 1998-2001.* Gembloux, Belgique: Centre wallon de Recherches agronomiques.

Machet J.M., Dubrulle P. & Louis P., 1990. Azobil®: a computer program for fertiliser N recommendations based on a predictive balance sheet method. In: Scaife A. *Proceedings of the 1st Congress of the European Society of Agronomy, 5th-7th December 1990, Paris, France.* Colmar, France: ESA/INRA/CEC.

Machet J.M. et al., 2007. Azofert: a new decision support tool for fertiliser N advice based on a dynamic version of the predictive balance sheet method. In: *Proceedings of the 16th International Symposium of the International Scientific Centre for Fertilizers, 16-19 September 2007, Ghent, Belgium.*

Meynard J.M., Justes E., Machet J.M. & Recous S., 1997. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ. In: Lemaire G. & Nicolardot B., eds. *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes.* Collection Les Colloques n°83. Paris: INRA, 183-200.

Van Orshoven J. & Vandenbroucke D., 1993. *Guide de l'utilisateur de Aardewerk - Base de données de profils pédologiques. Rapport 18B.* Louvain, Belgique: Instituut voor Land- en Waterbeheer, Katholieke Universiteit Leuven.

(7 réf.)