

L'isotope stable ^{15}N et le lysimètre, des outils complémentaires pour l'étude de la lixiviation de l'azote dans les sols agricoles

Jean-Pierre Destain ⁽¹⁾, Nathalie Fonder ⁽²⁾, Dimitri Xanthoulis ⁽²⁾, Véronique Reuter ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W). Département Production végétale. Rue du Bordia, 4. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : destain@cra.wallonie.be

⁽²⁾ ULg - Gembloux Agro-Bio Tech. Asbl Epuvaleau. Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

L'isotope stable ^{15}N a été utilisé dans des expérimentations en cases lysimétriques visant à étudier la lixiviation de l'azote dans les sols agricoles. À Gembloux, un apport de nitrate d'ammoniaque présentant une abondance isotopique de 2,161 At% ^{15}N a été appliqué à raison de 200 kg N·ha⁻¹ dans deux lysimètres, avant une culture d'épinard suivie de haricot et d'un froment d'hiver. La récupération de l'azote par les cultures a été de 39,8 % dans le premier lysimètre et de 62,2 % dans le second. Les concentrations en azote nitrique des eaux percolées du second ont été constamment plus élevées que dans le premier, probablement à cause d'une moindre immobilisation microbienne. À Remicourt et Omal, un reliquat de 150 kg N·ha⁻¹ (simulé par un apport de $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ en automne) a complètement disparu du profil du sol (0-90 cm) dès juillet de l'année suivante. Une culture de froment d'hiver à Omal n'a récupéré qu'environ 9 % de l'azote apporté à l'automne. La mesure de la teneur en azote nitrique des eaux percolées a montré des valeurs nettement plus élevées à Remicourt (jusqu'à plus de 70 mg N·l⁻¹) suite à un apport important de compost riche en azote, qu'à Omal. L'isotope ^{15}N n'a pu être détecté dans aucune des eaux lysimétriques, probablement par un manque de sensibilité de l'appareil.

Mots-clés. Azote, isotope stable ^{15}N , lysimètre, lixiviation.

Stable ^{15}N isotope and lysimeter, complementary tools in order to study the nitrogen leaching in agricultural soils. Stable ^{15}N was used in lysimetric trials conducted with the aim to study nitrate leaching of agricultural soils. At Gembloux, a rate of 200 kg N·ha⁻¹ as $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ with an isotopic abundance of 2.161 At% ^{15}N was applied in two lysimeters before a spinach crop, followed by beans and winter wheat; in the first lysimeter, total recovery by crops was less than 39.8% while in second lysimeter, recovery was 62.2%. Concentrations of N-NO₃⁻ in leached water were always higher in lysimeter 2 than lysimeter 1, probably due to less microbial immobilization of nitrogen. At Remicourt and Omal, a simulated mineral residue of 150 kg N·ha⁻¹ (rate of $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ applied in autumn) has completely disappeared from the soil profile (0-90 cm) already in July of the following year. At Omal, a winter crop has recovered no more than 9% of nitrogen rate applied in autumn. Measurement of N-NO₃⁻ concentration in leached water has shown clearly higher levels at Remicourt (even more than 70 mg N·l⁻¹ probably caused by an application of high rate of compost rich in nitrogen) than is Omal. Stable ^{15}N isotope could not be analyzed in leaching water probably due to a leak of sensitiveness of the analytical equipment.

Keywords. Nitrogen, stable ^{15}N isotope, lysimeter, leaching.

1. INTRODUCTION

L'intérêt de l'usage de l'isotope lourd, stable, ^{15}N est qu'il permet de préciser l'origine de l'azote qui est impliqué dans une multitude de processus d'un cycle complexe (Destain et al., 1997 ; 2001 ; Khelil et al., 2005) (minéralisation, organisation microbienne, prélèvement par les plantes, divers mécanismes de pertes). C'est en particulier le cas pour l'étude de la lixiviation où on peut s'intéresser soit à l'ensemble de la fumure, soit simuler un reliquat après culture

en ajoutant de l'engrais marqué en automne et suivre la progression du nitrate dans le profil du sol en automne.

Le lysimètre, qui est un système fermé, permet quant à lui de mesurer tant le flux de drainage que la concentration en nitrate de l'eau recueillie. Certains lysimètres, installés depuis plus de 30 ans, ont permis d'estimer les pertes d'azote par drainage pour différentes cultures ou rotations culturales (Balif, 1996).

L'objectif de cet article est d'affiner les bilans en azote des parcelles agricoles dans des situations à risques

d'un point de vue de la lixiviation d'azote (rotations culturales comportant des cultures légumières) en combinant les deux outils.

Trois expérimentations ont été mises en place :

- un suivi en conditions totalement contrôlées sur une succession culturale épinard/haricot/blé d'hiver d'une fertilisation azotée marquée dans deux lysimètres installés depuis 30 ans sur le site de la Faculté universitaire des Sciences agronomiques à Gembloux,
- la mesure de la vitesse de percolation dans le profil racinaire d'un reliquat automnal simulé (application d'une dose d'engrais marqué de 150 kg N·ha⁻¹),
- un suivi de la percolation d'un reliquat automnal simulé (application d'une dose d'engrais marqué de 150 kg N·ha⁻¹) dans les deux lysimètres installés dans le périmètre irrigué de Hesbaye (Remicourt et Omal).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour l'ensemble des expérimentations réalisées en sols limoneux profonds, l'isotope lourd ¹⁵N est mis en œuvre. L'engrais minéral appliqué est du nitrate d'ammoniaque ¹⁵NH₄⁺¹⁵NO₃⁻ présentant une abondance isotopique de 2,161 At%¹⁵N pour l'expérimentation 1 et de 5,500 At%¹⁵N pour les expérimentations 2 et 3.

Pour faciliter son homogénéité d'épandage, l'engrais est dissout dans de l'eau et réparti à l'aide de flacons doseurs.

Dans les placeaux, les profils de sols, prélevés à la sonde hydraulique, sont analysés pour leur contenu en azote total et en azote minéral (extraction KCl 0,1N suivant la méthode adoptée par le réseau REQUASUD). Une aliquote des solutions d'extraction est conservée et évaporée à sec après acidification en vue du dosage au spectromètre. Il en est de même pour les eaux en provenance des lysimètres pour lesquels jusqu'à 1 litre d'eau est évaporé à sec (pool de plusieurs échantillons).

Les échantillons de végétaux prélevés soit dans les cases lysimétriques de Gembloux, soit dans les placeaux, sont séchés, finement broyés avant leur passage au spectromètre de masse.

Le spectromètre de masse utilisé est un appareil de marque EUROPA Scientific, couplé à un analyseur élémentaire DUMAS. Il fournit comme résultat analytique la teneur en azote et son rapport isotopique ¹⁵N/¹⁴N, de celui-ci on déduit l'abondance isotopique naturelle (0,3663 At%¹⁵N) et on la confronte à celle de l'engrais d'origine. Les diverses teneurs en azote (N_{total}, N-NO₃⁻, N-NH₄⁺) des échantillons de sols, des extraits et des eaux sont obtenues par la chimie classique humide, préalablement au passage au spectromètre de masse.

Quant aux dispositifs expérimentaux, ils sont constitués par des lysimètres cylindriques de 2 m² de superficie et de 2 m de profondeur à Gembloux, et à Remicourt et à Omal, par des lysimètres de 1 m² enterrés à 50 cm, et donc non visibles, d'une hauteur totale de 1,50 m et dont l'exutoire est situé en dehors du champ.

Les protocoles expérimentaux sont repris dans le **tableau 1**. Il y est signalé que pour les lysimètres de Remicourt et Omal, l'application d'engrais marqué a été effectuée sur une superficie de 2 m², double de celle du lysimètre enterré, le centre du cercle d'épandage correspondant aux coordonnées levées par DGPS du centre du lysimètre enfoui.

3. RÉSULTATS

3.1. Étude du devenir d'une fumure azotée apportée au début d'une succession culturale épinard/haricot/blé. Essai lysimétrique de Gembloux

Les valeurs reprenant la production de masse engendrée par un seul apport d'azote (200 kg N·ha⁻¹) avant épinard, les exportations d'azote et le coefficient réel d'utilisation de cette fumure sont reprises dans le **tableau 2**.

La production de biomasse totale ne s'est élevée qu'à 11,7 t·ha⁻¹ pour le lysimètre 1, alors qu'elle est plus du double (24,2) pour le lysimètre 2. Il en est de même pour l'exportation d'azote (253,7 et 477,4 kg N·ha⁻¹), ainsi que pour le coefficient réel d'utilisation, mesuré grâce au marquage isotopique (39,8 et 62,2). Alors qu'un seul apport d'azote a été réalisé avant épinard, l'azote non prélevé par cette culture ne s'est plus avéré très disponible pour les cultures suivantes, car il était probablement fortement organisé ou, mais c'est peu probable pour la culture de haricot, lessivé. L'organisation, ou immobilisation microbienne, a semblé également prépondérante dans le lysimètre 1 où une végétation ligneuse s'était développée pendant plusieurs années avant sa remise en expérimentation.

La même différence de comportement des deux lysimètres s'est marquée en ce qui concerne la quantité d'azote (nitrique) percolée sur une période allant de la 1^{re} culture jusqu'à la 3^e, soit de l'année 2006 à juillet 2008 (**Tableau 3**).

Pour le lysimètre 1, les valeurs des concentrations en azote des eaux très faibles au début ont augmenté en janvier 2008, ce qui devait à peu près correspondre à l'arrivée du reliquat de la fumure appliquée. Cependant, les quantités d'azote percolées sont restées faibles, en raison de l'immobilisation prépondérante dans ce lysimètre.

Pour le lysimètre 2, les valeurs les plus élevées ont été observées dès le départ, c'est probablement

Tableau 1. Protocoles expérimentaux des essais menés — *Experimental layouts.*

Nature et localisation de l'essai	Composantes du bilan ¹⁵ N mesurées	Précédents culturaux	Dose N appliquée (kg N·ha ⁻¹)	Époque d'application (2006)	Cultures
Lysimètres Gembloux (nombre 2 - 2 m ²)	Biomasse Eau de percolation	Jachère non entretenue	200 ⁽¹⁾ —	03.05	Épinard, haricot en 2006 Blé d'hiver en 2007
Placeau Remicourt	N sol (total et minéral)	Froment d'hiver	150 ⁽²⁾	12.09	Carotte en 2007
Placeau Omal	N biomasse blé N sol (total+minéral)	Fève, épinard	150 ⁽²⁾	28.09	Blé d'hiver en 2007
Lysimètre Remicourt (nombre 1 - 1m ²)	Eau de percolation	Froment d'hiver	150 ⁽²⁾⁽³⁾	22.09	Carotte en 2007
Lysimètre Omal (nombre 1 - 1m ²)	Eau de percolation	Fève, épinard	150 ⁽²⁾⁽³⁾	20.10	Blé d'hiver en 2007

⁽¹⁾ ¹⁵NH₄¹⁵NO₃ : abondance isotopique 2,161 At%¹⁵N — *isotopic abundance 2.161 At%¹⁵N.*

⁽²⁾ ¹⁵NH₄¹⁵NO₃ : abondance isotopique 5,500 At%¹⁵N — *isotopic abundance 5.500 At%¹⁵N.*

⁽³⁾ L'application sur une surface de 2,216 m² est réalisée à l'aplomb du lysimètre enterré à 50 cm sous la surface du sol — *The spreading on a 2.216 m² area is realized upright of the lysimeter buried at 50 cm depth in the soil.*

Tableau 2. Production de biomasse, exportation et coefficient réel d'utilisation de l'azote par les cultures (lysimètres de Gembloux) — *Dry matter production, N removed, N recovery (true using ¹⁵N) by crops (Gembloux lysimeters).*

Lysimètre	Cultures et années	Production de biomasse aérienne (kg MS·ha ⁻¹)	Exportation d'azote (kg N·ha ⁻¹)	Coefficient réel d'utilisation (%)
1	Épinard 2006	3720	102	36,1
	Haricot 2006	3578	125	3,1
	Froment 2007	4465	26,7	0,6
	Total	11763	253,7	39,8
2	Épinard 2006	5740	194	50,3
	Haricot 2006	9070	240	10,9
	Froment 2007	9440	43,4	1,0
	Total	24250	477,4	62,2

Tableau 3. Quantité d'eau percolée, sa concentration moyenne en N-NO₃⁻ et quantité d'azote percolée (lysimètres de Gembloux) — *Volume of water collected, concentration in N-NO₃⁻ and nitrogen leached in the Gembloux lysimeters.*

Lysimètre	Période	Quantité d'eau percolée (l)	Concentration N-NO ₃ ⁻ (mg·l ⁻¹)	Quantité d'azote percolée (g par lysimètre)	Quantité d'azote percolée (kg N·ha ⁻¹)
1	2006	129	0,1	0,1	0,3
	2007 (=> 10.04)	281	0,5	0,1	0,7
	2007 (01.08-31.12)	167	11,0	1,8	9,2
	2008 (01.01-22.04)	435	24,1	10,5	52,4
	2008 (22.04-17.07)	21	23,0	0,5	2,4
	Total	1033		13,0	65,0
2	2006	151	65,0	9,8	49,1
	2007 (=> 10.04)	417	81,0	33,8	168,9
	2007 (01.08-31.12)	66	52,1	3,4	17,2
	2008 (01.01-22.04)	490	42,8	21,0	104,0
	2008 (22.04-17.07)	104	41,9	4,4	21,8
	Total	1228		72,4	360,9

le résultat de la surminéralisation due à la remise en culture.

Pour identifier la provenance de l'azote percolé, minéralisation naturelle ou reliquat simulé (engrais ^{15}N), les échantillons d'eau ont été analysés au spectromètre de masse. Aucun enrichissement isotopique n'a cependant pu être détecté, probablement en raison du manque de sensibilité de l'appareil ou d'un enrichissement insuffisant de l'engrais de départ.

3.2. Étude de la vitesse de percolation dans le profil racinaire d'un reliquat automnal simulé

Le **tableau 4** reprend l'évolution au cours du temps des quantités d'azote minéral totales et issues du reliquat dans le profil du sol pour les expérimentations de Remicourt et Omal, où un reliquat de $150 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ sous forme $^{15}\text{NH}_4$, $^{15}\text{NO}_3$ est simulé.

À Remicourt, la quantité minérale totale présente dans le profil a été en permanence très élevée, probablement en raison d'un apport très important d'azote organique sous forme de compost, l'année antérieure à l'expérimentation. Le reliquat automnal simulé a été totalement retrouvé (et même plus en raison de la variabilité expérimentale) et a persisté jusque fin janvier dans les 90 cm supérieurs du profil, ensuite la quantité retrouvée a diminué nettement pour disparaître en été (27 juillet 2007). La lixiviation peut être suivie en **figure 1**.

À Omal, où la quantité d'azote minéral dans le profil fut plus faible, la lixiviation s'est déroulée suivant le même rythme, mais une partie de l'azote a été récupérée par la culture de froment d'hiver qui a été implantée également à l'automne, ce qui explique la nette diminution de concentration en azote dès le 3 mai 2007.

Cette fraction récupérée par le blé d'hiver a pu être évaluée par mesure du coefficient réel d'utilisation de l'engrais par le froment (partie aérienne : paille + épis) sur une partie non perturbée du plateau de prélèvement (**Tableau 5**). Celui-ci s'est élevé à 9,3 % de l'azote appliqué à l'automne.

3.3. Suivi de la percolation du reliquat en azote automnal simulé dans les lysimètres

Le **tableau 6** reprend les quantités d'eau et d'azote percolées sur la période expérimentale automne 2006-été 2008.

À Remicourt, les quantités percolées sont restées modestes jusqu'en janvier 2008, moment où le nitrate issu de la minéralisation et du reliquat simulé atteignent le plancher du lysimètre. Les concentrations en nitrate sont devenues même excessivement élevées ($73,5 \text{ mg N}\cdot\text{NO}_3\cdot\text{l}^{-1}$ en juillet 2008).

À Omal, à la même période, une élévation de la teneur en azote nitrique des eaux percolées a également été observée, mais semble ne résulter que du reliquat simulé.

Malheureusement, ici aussi, les dosages isotopiques se sont révélés négatifs.

4. DISCUSSION

La mesure des pertes en nitrate à partir des sols agricoles n'est pas toujours aisée à effectuer car on se heurte souvent à des problèmes de variabilité liée tant au sol qu'au climat. De plus, parmi les techniques de mesure, certaines sont parfois difficiles à interpréter, c'est le cas notamment des bougies poreuses, dont la sphère d'influence n'est pas souvent clairement connue

Tableau 4. Évolution de l'azote minéral total et de l'azote minéral provenant de l'engrais (en $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$) sur une profondeur de sol de 90 cm à Remicourt et Omal — *Evolution of the total mineral nitrogen and mineral nitrogen originating from the fertilizer (in $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) on a soil profile 0-90 cm in Remicourt and Omal.*

	17.11.2006	16.01.2007	23.01.2007	07.03.2007	03.05.2007	27.07.2007
Remicourt						
N minéral total ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)	209,6	334,9	287,7	276,4	299,9	302,3
N minéral provenant du reliquat simulé*	147,7 ± 21	180,5 ± 16	155,7 ± 27	82,6 ± 16	44,0 ± 12	-
Omal						
N minéral total ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)	101,1	185,4	173,3	98,4	19,1	24,6
N minéral provenant du reliquat simulé*	93,4	132,7	110,2	53,1	9,1	-

*dose de $150 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ (voir **Tableau 1**).

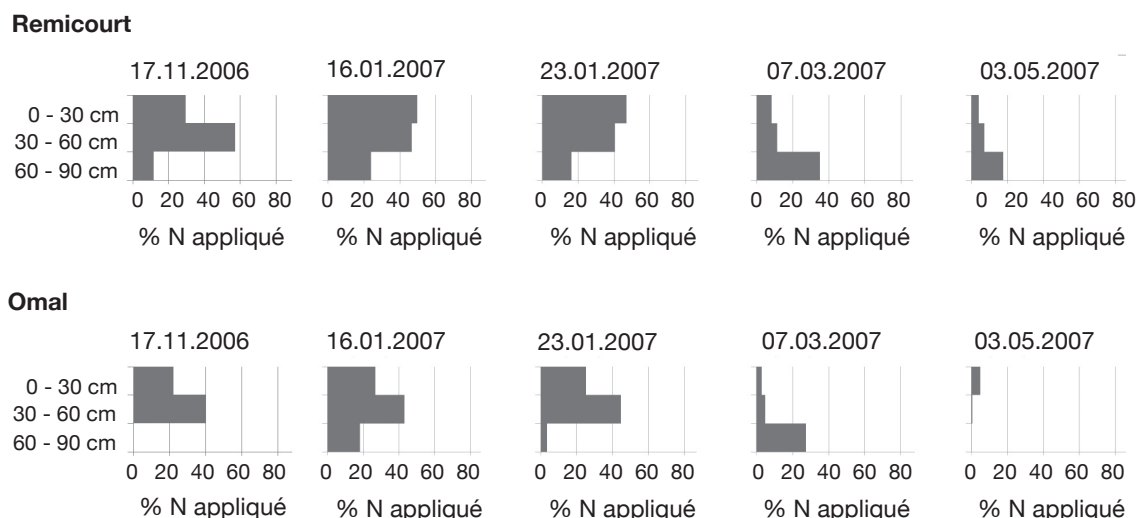


Figure 1. Répartition de l'azote provenant de l'engrais marqué dans le profil du sol à Remicourt et Omal (% N appliqué) — *Distribution of nitrogen originating from the labelled fertilizer in the soil profile at Remicourt and Omal (% N applied).*

Tableau 5. Production de biomasse, exportation d'azote et coefficient réel d'utilisation de l'azote de l'engrais par le blé d'hiver à Omal — *Dry matter production, nitrogen removed and true recovery of nitrogen fertilizer by winterwheat at Omal.*

Blé d'hiver 08.2007	Production de biomasse (kg MS·ha ⁻¹)	N exporté (kg N·ha ⁻¹)	N exporté provenant de la fumure (kg N·ha ⁻¹)	Coefficient réel d'utilisation (% N appliqué)
Paille	10033	47,1	3,86	2,57
Épis	11395	184,2	10,14	6,76
Total	21428	233,3	14,00	9,33

Tableau 6. Quantité d'eau percolée et lixiviation de l'azote dans les lysimètres de Remicourt et d'Omal — *Volume of water collected and nitrogen leached in the lysimeters of Remicourt and Omal.*

	Périodes	Quantité d'eau recueillie (l)	Teneur en N-NO ₃ ⁻ (mg·l ⁻¹)	Quantité d'azote percolée (kg N·ha ⁻¹)
Remicourt	janvier-février 2007	43,3	15,0	6,5
	mars 2007	31,2	13,5	4,2
	août-novembre 2007	73,3	16,6	12,2
	janvier-février 2008	43,2	44,2	19,1
	mars 2008	74,7	64,7	48,3
	avril-juillet 2008	87,3	73,5	64,3
	Total		353,0	
Omal	novembre-février 2007	64,2	8,0	5,1
	mars 2007	39,0	12,7	4,9
	janvier-février 2008	57,4	20,0	11,5
	mars 2008	43,5	26,2	11,4
	avril-juillet 2008	55,0	34,9	19,2
	Total		259,1	

et dont le fonctionnement est délicat en sols lourds (Addiscott et al., 1992).

Si le lysimètre procure des résultats plus aisés d'interprétation, il est plus couteux à mettre en place et ne se stabilise qu'après une période plus ou moins longue après son implantation ou sa remise en fonctionnement normal (cas de l'expérimentation de Gembloux).

Les recherches utilisant ^{15}N apportent une compréhension plus approfondie de la problématique nitrate (Recous et al., 1988 ; Destain et al., 2001) mais la détection de ^{15}N apparaît parfois délicate, comme dans les eaux de percolation des expérimentations menées ici.

Il n'en reste pas moins que les observations réalisées lors de ces essais mettent clairement en évidence le risque de lixiviation de nitrate sous des rotations culturales comportant des légumes, et où la culture suivante de froment d'hiver est peu efficace pour prélever le reliquat engendré par les légumes, d'autant plus que son développement racinaire n'atteint que relativement tard le bas du profil où ce reliquat se situe (celui-ci se situant au-delà des 90 cm dès le mois de mai).

Un reliquat en azote minéral à l'automne est donc clairement synonyme d'azote potentiellement lessivable s'il ne peut être piégé par une culture intermédiaire adéquate (moutarde, ray-grass) ou éventuellement par l'épandage d'une matière organique à C/N élevé (type paille), immobilisant de l'azote.

De toute manière, il faudra considérer que ce piégeage est temporaire et que le cycle immobilisation – minéralisation a un turn-over assez rapide dans les sols cultivés. Outre la gestion de l'interculture, l'adaptation de la fumure aux besoins des cultures, en

tenant compte du potentiel de fourniture en azote du sol, reste un moyen efficace de limiter ce reliquat en azote minéral du sol et son risque de lixiviation.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs plus vifs remerciements au SPW-DGARNE pour le financement partiel de cette recherche.

Bibliographie

- Addiscott T.M. & Withmore A., 1992. *Farming, fertilizers and nitrate problem*. Wallingford, UK: CAB International.
- Balif J.L., 1996. Les lysimètres en sol de craie de Châlons-sur-Marne. In : *Trente ans de lysimétrie en France 1960-1990*. Paris : INRA Éditions ; COMIFER, 115-249.
- Destain J.-P. et al., 1997. *Améliorer l'efficience de l'azote, priorité économique, nécessité environnementale*. Gembloux, Belgique : CRA-W, 4-10.
- Destain J.-P., Reuter V. & Goffaux M.J., 2001. L'intérêt de l'emploi de l'isotope lourd ^{15}N dans l'étude du cycle de l'azote dans les sols agricoles. *Pedologie-Themata*, **11**, 13-15.
- Khelil M.N., Rejeb S., Henchi B. & Destain J.-P., 2005. Effect of fertilizer rate and water irrigation quality on the recovery of ^{15}N labelled fertilizer applied to Sudangrass. *Agron. Sustainable Dev.*, **25**, 137-143.
- Recous S., Fresneau C., Faurie G. & Mary B., 1988. The fate of ^{15}N labelled urea and ammonium nitrate applied to winter wheat crop. II. Plant uptake and efficiency. *Plant Soil*, **112**, 215-224.

(6 réf.)