

Suivi de la lixiviation du nitrate en plein champ par la technique lysimétrique : retour de huit années d'expérience

Mathieu Deneufbourg ⁽¹⁾, Christophe Vandenberghe ⁽¹⁾, Benoît Heens ⁽²⁾,
Jean Marie Marcoen ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité Systèmes Sol-Eau. GRENeRA. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : mathieu.deneufbourg@ulg.ac.be

⁽²⁾ Province de Liège - Agriculture. Centre Provincial Liégeois des Productions Végétales et Maraichères (CPL Végémar) ASBL. Rue de Huy, 123. B-4300 Waremme (Belgique).

Depuis 2003, la lixiviation du nitrate est suivie dans six parcelles situées en région limoneuse (Hesbaye, Belgique) vouée aux grandes cultures et aux cultures légumières industrielles. L'outil utilisé pour ce suivi est le lysimètre, installé en conditions réelles d'exploitation des parcelles, de manière à ne pas entraver les opérations culturales. Un des objectifs de l'étude est l'évaluation de l'APL (Azote Potentiellement Lessivable) défini dans le Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en tant qu'indicateur environnemental en comparant les modes de gestion de l'azote (en ce compris les conseils de fertilisation), les valeurs d'APL et la qualité de l'eau de percolation. Les résultats obtenus montrent que les lysimètres constituent un outil efficace pour récolter des volumes représentatifs de l'eau en voie de percolation. Cette étude a validé l'APL en tant que bon indicateur de la concentration en nitrate qui sera mesurée de six à dix-huit mois plus tard dans l'eau de percolation, à une profondeur où il ne sera pas récupérable par la culture suivante. La lixiviation de l'azote nitrique observée *in situ* montre la nécessité et la pertinence des normes d'épandage définies dans le PGDA. Par ailleurs, l'outil lysimétrique a clairement mis en évidence que le maintien de la qualité de l'eau de percolation sous les terres agricoles doit être approché par une gestion intégrée et globale des rotations et successions culturales complètes, en ce compris les fertilisations raisonnées et l'implantation de CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate). Des successions culturales favorables et défavorables à la qualité de l'eau de percolation ont ainsi pu être identifiées.

Mots-clés. Lysimètre, lixiviation, nitrate, pollution de l'eau, agriculture, Belgique.

Monitoring of nitrate leaching in open fields by lysimeters: results from an eight year study. Since 2003, nitrate leaching has been monitored in six plots located in a loamy area (Hesbaye, Belgium), mainly dedicated to wheat, sugarbeet and vegetable crops. Open-field lysimeters have been used in order not to impede agricultural operations. Lysimeters are used as follow-up tools to quantify the amounts of nitrate leaching below the root zone. This study aims to evaluate the suitability of PLN (Potentially Leachable Nitrogen – APL in French) defined in the Sustainable Nitrogen Management Program (PGDA in French) as an environmental indicator by relating nitrogen management practices (including fertilization recommendations) to PLN values and groundwater quality. This study demonstrates that lysimeters are efficient in collecting representative amounts of leaching water. Lysimeters show that PLN is identified as being related to the nitrate content in leaching water, which will not be taken up by the next crop. The amount of nitrate leaching below the root zone demonstrates the necessity and the relevance of the organic nitrogen spreading limits defined in the Sustainable Nitrogen Management Program. The lysimeter tool also shows that respect for leaching water quality standards under agricultural plots needs to be considered from an integrated and generalized approach, taking into account complete crop sequences and rotations, including rational fertilization rates and the introduction of catch crops in rotation. Some suitable or unsuitable crop sequences with regard to good groundwater quality are listed.

Keywords. Lysimeters, leaching, nitrate, water pollution, agriculture, Belgium.

1. INTRODUCTION

Depuis le milieu des années 1970, la concentration en nitrate dans les eaux souterraines a significativement augmenté en Wallonie (région wallonne de Belgique)

(Vandenberghe, 2010). L'évolution de la qualité de l'eau est partiellement liée à l'évolution de l'agriculture (augmentation du cheptel, augmentation des superficies dévolues au maïs et diminution des superficies de prairie, augmentation de l'utilisation d'azote minéral et

organique). Les secteurs « industriel » et « domestique » y contribuent également. Compte tenu de l'épaisseur variable de la zone non saturée surmontant les aquifères wallons ainsi que de l'inertie du système, il convient de tenir compte d'un temps de réponse parfois important entre les actions menées en surface (mise en œuvre d'un programme d'actions, par exemple) et leur impact sur la qualité de l'eau dans l'aquifère. Ainsi, pour l'aquifère du Crétacé de Hesbaye, l'impact de l'agriculture sur la qualité de l'eau se marque avec plus d'une décennie de retard (Dautrebande et al., 1996).

La surveillance de la qualité des eaux est organisée au travers du « *Survey Nitrate* » (Cellule État de l'Environnement Wallon, 2007) qui est constitué de près d'un millier de points d'observations répartis dans les eaux souterraines en région wallonne. Le *Survey Nitrate*, tel qu'il est réalisé, présente une vue d'ensemble de l'état (en termes de concentration en nitrate) des eaux souterraines, mais ne permet pas de distinguer l'impact d'une politique environnementale mise en place dans l'un ou l'autre secteur d'activités. Le transit du nitrate dans la zone vadose constitue donc la véritable inconnue du système.

L'utilisation de lysimètres se révèle être une méthode efficace pour lever partiellement et dans un délai raisonnable cette inconnue. La méthode lysimétrique a pour objet l'étude de la migration en profondeur d'éléments dans le but de réaliser des bilans entrées – sorties. Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de lysimètres a permis d'importantes avancées dans la compréhension des processus impliqués dans la contamination des ressources en eaux souterraines par les pesticides, le nitrate ou les micro-organismes notamment (Goss et al., 2010).

En mars 2003 débutait une étude de deux ans qui a mis en place et exploité six lysimètres dans la région limoneuse de Hesbaye (Fonder et al., 2005), vouée principalement aux cultures industrielles légumières. Suite à celle-ci, trois autres études ont permis d'assurer le suivi de la lixiviation de l'azote nitrique grâce à l'outil lysimétrique (Fonder et al., 2007 ; Deneufbourg et al., 2010a ; Deneufbourg et al., 2012). Les objectifs de ces études étaient de :

- fournir rapidement, par rapport au temps de réponse d'un aquifère, et de manière ciblée au secteur agricole, une assurance quant à la pertinence des normes et des valeurs des APL de référence (Vandenberghe et al., 2013) définies dans le PGDA (Programme de Gestion Durable de l'Azote) pour évaluer la bonne gestion de l'azote ;
- vérifier l'adéquation entre ces valeurs de référence, les conseils de fumure et l'objectif de préservation de la qualité de l'eau ;
- apporter des arguments objectifs quant aux pratiques et rotations à conseiller, revoir ou éviter.

Depuis 2008, une expérimentation portant sur une réduction des niveaux de fertilisation et ses effets en termes de rendement sur la culture, de reliquats azotés du sol et de concentrations en nitrate dans l'eau récoltée est en cours à l'aplomb des lysimètres (Deneufbourg et al., 2010b ; Heens et al., 2013). L'implantation de CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate) en interculture courte a également été testée, soit dans des parcelles équipées d'un lysimètre, soit dans une parcelle située à proximité.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Description des sites d'étude

Les lysimètres sont installés dans la région de Hesbaye (Province de Liège, Wallonie – **figure 1**) au sein de trois fermes faisant partie du « Survey Surfaces Agricoles », réseau de 34 exploitations situées sur le territoire wallon et dans lesquelles près de 240 parcelles sont suivies en matière de gestion de l'azote, dans le but d'établir annuellement les valeurs d'APL de référence. Ces parcelles sont également suivies par l'ASBL Centre Provincial Liégeois des Productions Végétales et Maraichères (CPL Végémar) qui contribue notamment à la gestion du périmètre irrigué utilisant des eaux usées de l'usine de surgélation et de conditionnement de légumes S.A. Hesbaye Frost. Cinq des six lysimètres sont implantés dans des parcelles irrigables, soit à l'eau claire, soit à l'eau usée provenant de l'usine.

Contexte pédologique. Les six lysimètres sont installés sur des sols limoneux représentatifs de la région de Hesbaye. Il s'agit soit de sols à horizon B textural (Aba selon la Carte des Sols de Belgique, CSB) en position de plateau ou de pente, soit de sols sur colluvions (Abp selon la CSB) dans les bas de pentes et dépressions. Des variantes existent dans l'épaisseur des dépôts de colluvions et l'intensité du drainage naturel. Chaque site a été caractérisé d'un point de vue pédologique par

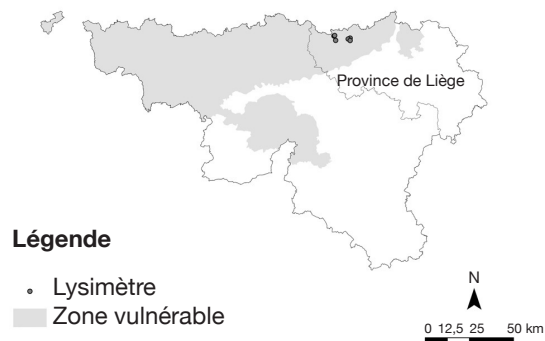


Figure 1. Localisation des lysimètres en Wallonie — *Lysimeters localization in Wallonia.*

un sondage à la tarière, jusqu'à la profondeur de 2 m (Fonder et al., 2005).

Itinéraires culturels. En conditions réelles d'exploitation, les cultures installées au droit des lysimètres résultent du choix des agriculteurs.

Cinq lysimètres sont installés dans des parcelles intégrant des cultures légumières industrielles en rotation avec les grandes cultures classiques (**Tableau 1**) et un lysimètre (P6) est installé dans une parcelle cultivée uniquement de grandes cultures classiques (céréales, betterave, chicorée) avec apports réguliers de matière organique.

Les données collectées relatives aux cultures sont les dates de semis et de récolte, la fertilisation azotée organique ou minérale (date et quantité), ainsi que les rendements. Les dates de semis et d'enfouissement des CIPAN sont également renseignées.

Depuis 2008 et la mise en place de dispositifs expérimentaux, la fertilisation azotée à l'aplomb immédiat des lysimètres n'est plus pilotée par l'agriculteur mais répond à une volonté de tester une réduction des conseils de fertilisation en cultures légumières industrielles.

2.2. Les lysimètres

Les lysimètres mis en place en Hesbaye sont constitués d'un cylindre en inox de 1 m² de section pour une

hauteur de 1,5 m (**Figure 2**). La cuve lysimétrique est placée verticalement à 50 cm sous la surface du sol, pour être en conditions réelles d'exploitation et sans gêne pour les pratiques agricoles, en plein champ, à l'extérieur des tournières. Le plancher drainant, situé à

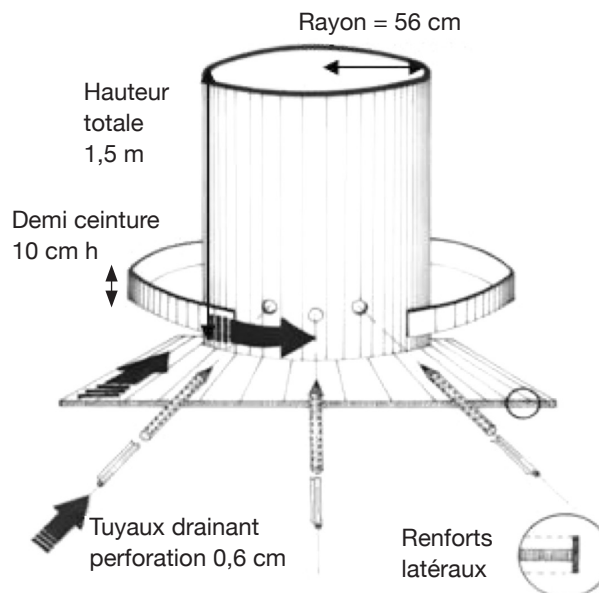


Figure 2. Schéma du lysimètre, système non remanié — *Sketch of the lysimeter tank, undisturbed system* (Fonder et al., 2010).

Tableau 1. Itinéraires culturels dans les parcelles équipées d'un lysimètre — *Crop rotations in plots where lysimeters were implemented.*

Année	Parcelles					
	Agriculteur 1		Agriculteur 2			Agriculteur 3
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
2004	Fève / chou frisé	Épinard / haricot + CIPAN	Froment + CIPAN	Betterave	Haricot	Lysimètre pas encore installé
2005	Carotte	Chicorée	Fève	Froment + CIPAN	Froment + CIPAN	
2006	Pomme de terre	Froment	Froment + CIPAN	Haricot	Fève / épinard	
2007	Betterave	Carotte + CIPAN	Haricot	Froment + CIPAN	Froment	
2008	Froment + CIPAN	Fève / chou frisé	Froment + CIPAN	Betterave	Carotte	
2009	Fève / épinard	Poireau	Fève / épinard	Froment + CIPAN	Haricot	Froment + CIPAN
2010	Poireau	Pois / haricot	Betterave	Fève / épinard	Froment	Betterave
2011	Haricot + CIPAN	Pomme de terre + CIPAN	Froment + CIPAN	Froment + CIPAN	Pépinière d'arbres fruitiers	Froment + CIPAN
2012	Betterave	Froment + CIPAN	Carotte	Haricot	Pépinière d'arbres fruitiers	Pois + CIPAN

2 m de profondeur, évacue par le biais d'un tuyau les eaux récoltées par le lysimètre vers un bidon de récolte placé dans une chambre de visite construite en bordure de champ.

L'analyse des avantages et des inconvénients des systèmes lysimétriques (Müller, 1996) a orienté le choix vers un système de type fermé (ou plutôt « semi-fermé » car enfoncé à 50 cm sous la surface du sol). C'est le seul système qui permet de mesurer simultanément la solution de drainage et sa concentration dans un volume parfaitement défini, tout en permettant une exploitation en plein champ, sans gêne pour les opérations culturales.

Entre avril et aout 2003, cinq lysimètres ont été implantés dans les parcelles de deux exploitations de Hesbaye. Le sixième lysimètre a été placé en aout 2009 dans une parcelle (**Tableau 1** - P6) d'une troisième exploitation, permettant d'étudier l'impact d'apports organiques plus réguliers sur la qualité de l'eau.

Sur les six lysimètres mis en place, trois ont été installés en remaniant le sol et trois sans remaniement du sol lors de l'installation. Les systèmes non remaniés ont été mis en place par enfoncement vertical du cylindre lysimétrique, à l'aide d'un bras de pelle hydraulique. La plaque de fond a ensuite été chassée horizontalement et l'étanchéité a été réalisée par des joints de soudure (**Figure 2**). Trois tuyaux en inox perforés et remplis d'un géotextile percent le bas de la cuve et sont interconnectés pour l'évacuation des percolats du fond de la cuve lysimétrique vers une chambre de visite en bordure de champ. Les systèmes remaniés ont été installés en creusant une fosse dans laquelle la cuve lysimétrique préalablement soudée en atelier a été déposée. La cuve est remplie des couches successives de sol, soigneusement séparées

lors du creusement, sur base des observations du profil pédologique.

2.3. Essais d'implantation de CIPAN en interculture courte

Certaines cultures telles que le pois, le haricot ou la pomme de terre (plants ou variétés hâtives) engendrent généralement des APL élevés en raison, entre autres, de la minéralisation estivale de leurs résidus. La date de récolte de celles-ci (de juin à aout) permet d'envisager l'implantation d'une CIPAN entre leur récolte et le semis éventuel d'un froment en automne, dans le but de limiter la lixiviation du nitrate. Cette étude a été l'occasion de tester l'impact sur l'APL de l'implantation d'une CIPAN en interculture courte (moins de trois mois entre la récolte de la culture principale en été et le semis de la culture suivante en automne). Trois essais ont été mis en place entre 2009 et 2011, soit sur des parcelles équipées d'un lysimètre, soit sur une parcelle située à proximité. Deux objets (avec quatre répétitions) ont été testés dans chacun de ces essais : sol nu ou implantation d'une CIPAN (nyger, avoine brésilienne ou moutarde) entre la culture principale et le froment semé après destruction de celle-ci, mi-octobre.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Bilan hydrique

Le **tableau 2** présente les bilans hydriques récapitulatifs pour quatre des six parcelles équipées d'un lysimètre.

Tableau 2. Bilans hydriques des lysimètres par saison de drainage — *Water balance of lysimeters per drainage season.*

Saison de drainage	P (mm)	Parcelle 1			Parcelle 2			Parcelle 5			Parcelle 6		
		I (mm)	V (l)	%	I (mm)	V (l)	%	I (mm)	V (l)	%	I (mm)	V (l)	%
2003-2004	538	30	0	0	0	0	0	0	62	11	/	/	/
2004-2005	810	15	142	17	45	95	11	0	203	25	/	/	/
2005-2006	656	0	46	7	33	10	1	0	4	1	/	/	/
2006-2007	685	0	78	11	75	112	15	161	125	15	/	/	/
2007-2008	1193	0	362	30	0	208	17	0	161	14	/	/	/
2008-2009	498	0	77	15	54	160	29	0	30	6	/	/	/
2009-2010	570	100	84	13	52	71	11	40	112	18	0	49	9
2010-2011	528	60	106	18	15	206	38	55	97	17	0	114	22
Moyenne				16			15			14			15

P : pluviométrie — *rainfall* ; I : irrigation — *irrigation* ; V : volumes d'eau récoltés — *water collected* ; % : pourcentage de la pluviométrie récolté — *fraction of rainfall collected* = $(V/(P+I))$.

Ceux-ci permettent de donner une appréciation du fonctionnement des lysimètres installés et de vérifier que les quantités d'eau récoltées par percolation à la base des lysimètres à 2 m de profondeur sont représentatives des eaux en voie de migration vers les réserves en eaux souterraines.

Les bilans des parcelles 3 et 4 ne sont pas montrés ici ; en effet, il est vite apparu après leur installation que les volumes d'eau récoltés à la base de ces lysimètres étaient supérieurs à la pluviométrie, signe du drainage de la nappe locale lors de remontées temporaires hivernales. L'installation d'un réseau de piézomètres autour de ces lysimètres et leur suivi durant une saison de drainage complète a permis de confirmer le drainage partiel de cette nappe. À la suite de ces observations, ces deux lysimètres ont été équipés d'une vanne qui ferme l'exutoire du lysimètre dès que la frange capillaire de la nappe est captée, lors de remontées temporaires hivernales.

La durée des saisons de drainage est variable en fonction des conditions climatiques de l'année et des conditions culturales de la parcelle. Ceci peut expliquer les écarts parfois importants de pluviométrie observés entre les différentes années (**Tableau 2**). Généralement, les saisons de drainage s'étalent de la fin de l'automne (novembre - décembre) jusqu'au milieu du printemps (avril - mai).

On considère que pour une pluviométrie ramenée à 100 %, 6 à 28 % migreront en profondeur et participeront à la recharge des nappes d'eaux souterraines. Ce pourcentage varie en fonction des conditions géo-pédologiques, de l'occupation du sol, etc. On voit dans le **tableau 2** que les fractions moyennes de la pluviométrie qui sont récoltées dans les lysimètres varient de 14 % à 16 % en fonction de la parcelle. Ces fractions sont donc tout à fait conformes aux fractions attendues de la pluviométrie en voie de migration vers des horizons plus profonds et participant à la recharge des aquifères.

Les lysimètres des parcelles 1 et 2 ont nécessité une saison de drainage après leur mise en place pour que la percolation reprenne au travers de ceux-ci. Par la suite, les volumes d'eau récoltés dans les lysimètres non influencés par une remontée temporaire de la nappe sont restés dans la gamme des valeurs attendues, compte tenu des précipitations (et des irrigations) observées, prouvant leur bon fonctionnement hydrologique après une année de perturbations dues à leur installation. Les variations interannuelles de percolation observées au sein d'une même parcelle s'expliquent par les conditions climatiques et parcellaires (couverture hivernale du sol ou non, culture plus ou moins consommatrice d'eau, etc.) de l'année, conditionnant les valeurs d'évapotranspiration et l'ensemble du bilan hydrique de chaque parcelle.

3.2. Qualité de l'eau de percolation récoltée

Évaluation de l'indicateur environnemental APL.

Globalement, les observations des concentrations en nitrate dans les lysimètres depuis le début de l'étude montrent qu'il existe une correspondance entre l'APL mesuré à l'automne (exprimé en $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$) et la concentration moyenne en nitrate (exprimée en $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$) de l'eau récoltée à l'exutoire des lysimètres lors de la saison de drainage suivante (**Figure 3**). Malgré cette bonne correspondance (équivalence des ordres de grandeur), il ne faut pas en attendre une précision de l'ordre du $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$, ce qui n'est d'ailleurs pas le but recherché.

Cependant, dans certaines situations, la correspondance entre l'APL et la concentration en nitrate dans l'eau de percolation n'est cependant plus vérifiée. On peut citer l'exemple d'un apport accidentellement trop important de compost de déchets verts (voir p 7), alors que les APL mesurés les quatre années suivant cet apport de compost étaient corrects (entre 20 et 90 $\text{kg N-NO}_3^- \cdot \text{ha}^{-1}$), les concentrations dans l'eau de percolation récoltée durant la même période étaient d'un ordre de grandeur beaucoup plus élevé (entre 110 et 350 $\text{mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$). Le front d'avancement du nitrate dans le sol consécutif à cet apport de compost a donc migré sous la profondeur d'enracinement des cultures légumières présentes sur cette parcelle durant les quatre années suivantes et est en cours de récupération à la base du lysimètre (à 2 m) durant cette même période.

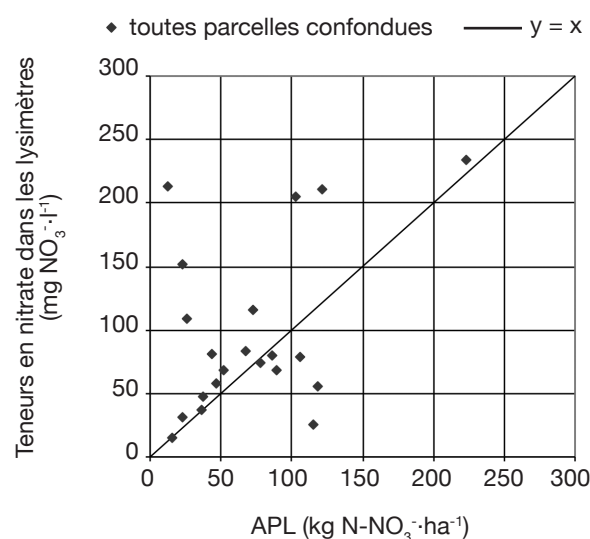


Figure 3. Relation entre l'Azote Potentiellement Lessivable (APL) mesuré en automne et la teneur moyenne en nitrate dans l'eau de percolation lors de la saison de drainage suivante — *Relation between Potentially Leachable Nitrogen (PLN) in autumn and mean nitrogen content of leaching water during the next leaching season.*

Le temps de réponse de la concentration à la base du lysimètre vis-à-vis de l'APL varie entre 6 et 18 mois en fonction des conditions (climatiques et culturales) de la parcelle. Ce temps de réponse correspond au temps nécessaire pour que la quantité de nitrate mesurée sur 90 cm descende jusqu'à la base du lysimètre, à 2 m de profondeur.

Impact des successions culturales et des rotations sur la qualité de l'eau. L'outil lysimétrique a mis en évidence que, outre la mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée, les successions et rotations culturales (en ce compris les CIPAN) ont un impact prépondérant sur la qualité des eaux de percolation sous les terres agricoles.

Des graphiques de synthèse ont été réalisés pour chaque parcelle. Ceux-ci reprennent les volumes cumulés d'eau de percolation collectée (en litres), les concentrations en nitrate mesurées dans cette eau de percolation (en $\text{mg NO}_3\text{-l}^{-1}$), ainsi que les mesures de reliquat azoté dans le sol (en $\text{kg N-NO}_3\text{-ha}^{-1}$). Les successions et rotations culturales ainsi que les apports azotés sont également repris dans ces figures. À titre illustratif, le graphique de synthèse de la parcelle P1 est présenté à la **figure 4**. Il est important de noter que, depuis le début de l'étude, les apports azotés dans ces parcelles ont été raisonnés, faisant l'objet de conseils de fertilisation basés sur des prélèvements de sol ; une réduction des conseils de fertilisation a également été testée pour certaines cultures à partir de 2008.

Les premiers échantillons d'eau ont été récoltés lors de l'hiver 2004-2005, suite à une double culture légumière de fève des marais et de chou frisé, laissant un APL relativement élevé ($86 \text{ kg N-NO}_3\text{-ha}^{-1}$). La concentration moyenne en nitrate dans l'eau récoltée à 2 m de profondeur lors de l'hiver suivant s'élevait à $80 \text{ mg NO}_3\text{-l}^{-1}$, soit un ordre de grandeur comparable à l'APL.

Les conditions climatiques de l'été et de l'automne 2005 (sècheresse et températures élevées) n'ont pas permis de réapprovisionner suffisamment le stock en eau du sol pour assurer la reprise de la percolation lors de l'hiver 2005-2006.

La culture de pomme de terre implantée en 2006 a laissé des APL relativement importants (de 80 à $140 \text{ kg N-NO}_3\text{-ha}^{-1}$). On observe une migration du nitrate des horizons de surface vers les horizons de profondeur au cours de l'automne. Ceci est confirmé par la mesure des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation lors de la saison de drainage suivante, avec une augmentation de la concentration dans le temps, pour une valeur moyenne de $81 \text{ mg NO}_3\text{-l}^{-1}$.

Les années 2007 et 2008 ont vu cette parcelle emblavée d'une succession betterave – froment – CIPAN. Les APL obtenus à la suite de ces cultures ne dépassaient pas $50 \text{ kg N-NO}_3\text{-ha}^{-1}$. Il ressort des mesures dans l'eau de percolation que les concen-

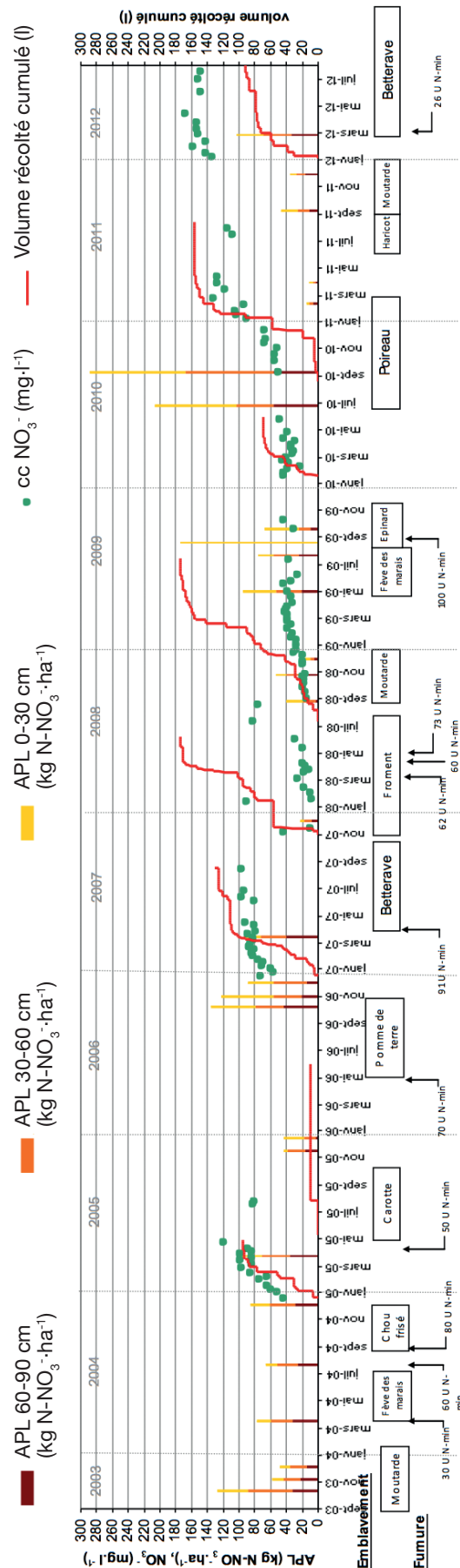


Figure 4. Synthèse des mesures et observations, parcelle P1 — Summary graph of measurements and observations, plot P1.

trations en nitrate ont diminué suite à cette succession culturale (26 et 31 mg NO₃⁻·l⁻¹ en moyenne lors des saisons de drainage 2007-2008 et 2008-2009).

Suite à l'introduction d'une succession fève des marais – épinard d'automne sur cette parcelle en 2009, une légère augmentation de la concentration moyenne en nitrate dans l'eau de percolation est observée (37 mg NO₃⁻·l⁻¹), tout en restant faible dans l'absolu au regard de ce type de cultures.

En juillet 2010, des poireaux ont été repiqués sur cette parcelle. Étant donné les quantités importantes d'azote nitrique dans le sol à ce moment, aucun apport d'azote n'a été effectué sur les poireaux à l'aplomb du lysimètre. Les reliquats azotés mesurés en sortie d'hiver montrent une fuite de l'azote nitrique sous les 90 cm durant l'hiver. Une forte augmentation des concentrations en nitrate dans l'eau récoltée dans les lysimètres est d'ailleurs observée au cours de cette saison de drainage, avec une valeur moyenne de 83 mg NO₃⁻·l⁻¹.

Enfin, en 2011, une culture de haricot a été implantée sur cette parcelle. Pour les besoins d'une expérimentation, aucun apport azoté n'a été effectué sur les haricots situés à l'aplomb du lysimètre et une CIPAN (moutarde) a été implantée après la récolte du haricot. Malgré un APL tout à fait acceptable pour ce type de culture (inférieur à 40 kg N-NO₃⁻·ha⁻¹) en raison du développement de la moutarde qui a prélevé l'azote nitrique libéré par les résidus de haricot, les concentrations en nitrate mesurées dans l'eau de percolation lors de l'hiver 2011-2012 étaient élevées (~ 150 mg NO₃⁻·l⁻¹). Il est probable que la quantité importante de nitrate passée sous les 90 cm de profondeur lors de l'hiver 2010-2011 a continué d'être récupérée dans le lysimètre l'année suivante, ne pouvant être prélevée par le haricot, culture à faible enracinement.

De manière générale, cette parcelle est illustrative des enseignements qui ont été tirés de l'observation de la qualité de l'eau de percolation récoltée dans les six lysimètres installés en plein champ et de sa mise en relation avec les successions culturales observées sur ces parcelles. Au terme de huit années de suivi de la lixiviation du nitrate, les constats suivants peuvent être retenus :

- une succession betterave – céréale – CIPAN, associée à une fertilisation raisonnée, permet d'obtenir une eau de percolation faiblement chargée en nitrate. L'enracinement profond de ces cultures, la durée élevée de leur cycle de croissance et la couverture hivernale du sol permettent d'expliquer l'obtention d'une bonne qualité de l'eau de percolation en termes de nitrate ;
- l'absence de CIPAN après céréale se marque par une augmentation de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation, ce qui constitue un argument en

faveur d'une couverture hivernale sur un maximum de surfaces après une céréale ;

- l'introduction de cultures à risques en termes d'APL (pomme de terre, par exemple) se marque par une augmentation des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation l'année suivante. L'introduction d'une CIPAN et/ou d'une culture hivernale (céréale) après ce type de cultures permet d'atténuer ce constat ;
- l'introduction d'une (double) culture légumière entraîne une augmentation parfois significative des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation. Le faible enracinement de ces cultures, leur court cycle de développement et la minéralisation automnale de leurs résidus permettent d'expliquer ce constat. L'implantation (dans la mesure du possible) d'une CIPAN après ces cultures permet de limiter la dégradation de la qualité de l'eau.

Impact de l'apport de matière organique sur la qualité de l'eau. Une des parcelles suivies (P2) a fait l'objet d'un apport de compost de déchets verts (25 t·ha⁻¹) après une céréale en 2006. L'analyse, parvenue trop tard à l'agriculteur, a montré que le compost était beaucoup plus riche en azote que prévu (25 kg N·t⁻¹) ; au final, 625 kg N·ha⁻¹ ont donc été appliqués sous forme organique sur cette parcelle à l'automne 2006, ne respectant pas les prescriptions du PGDA (plafond de 230 kg N·ha⁻¹ sous forme organique en terre de culture). L'impact de cet apport excessif d'azote organique est illustré à la **figure 5**.

L'apport de ce compost affecte sans délai les APL mesurés à l'automne 2006 (de 180 à 260 kg N-NO₃⁻·ha⁻¹). Les concentrations en nitrate dans l'eau récoltée à 2 m de profondeur augmentent brutalement au mois de janvier 2008, soit quinze mois après l'apport de compost. Du fait de son faible enracinement, la culture de carotte implantée en 2007 n'a donc pas pu prélever l'importante quantité d'azote nitrique lixivié en profondeur. Dans les conditions de l'année 2007 (drainage favorable et culture à faible enracinement), le temps de réponse de la qualité de l'eau de percolation à 2 m de profondeur aux pratiques agricoles était donc de 15 mois.

Au cours de l'année 2008, les concentrations en nitrate dans l'eau ont augmenté progressivement pour atteindre un pic à 400 mg NO₃⁻·l⁻¹ au début de l'année 2009, soit plus de 27 mois après l'application du compost. Par la suite, les concentrations ont diminué pendant deux années, tout en restant élevées dans l'absolu. Ce n'est qu'au cours de l'hiver 2010-2011 que les concentrations ont retrouvé une valeur normale et attendue au regard des APL mesurés. Compte tenu des volumes drainés pendant les hivers 2007-2008 et 2008-2009, ce sont 249 kg N-NO₃⁻·ha⁻¹ qui ont été lixiviés en profondeur durant ces deux saisons de drainage et qui

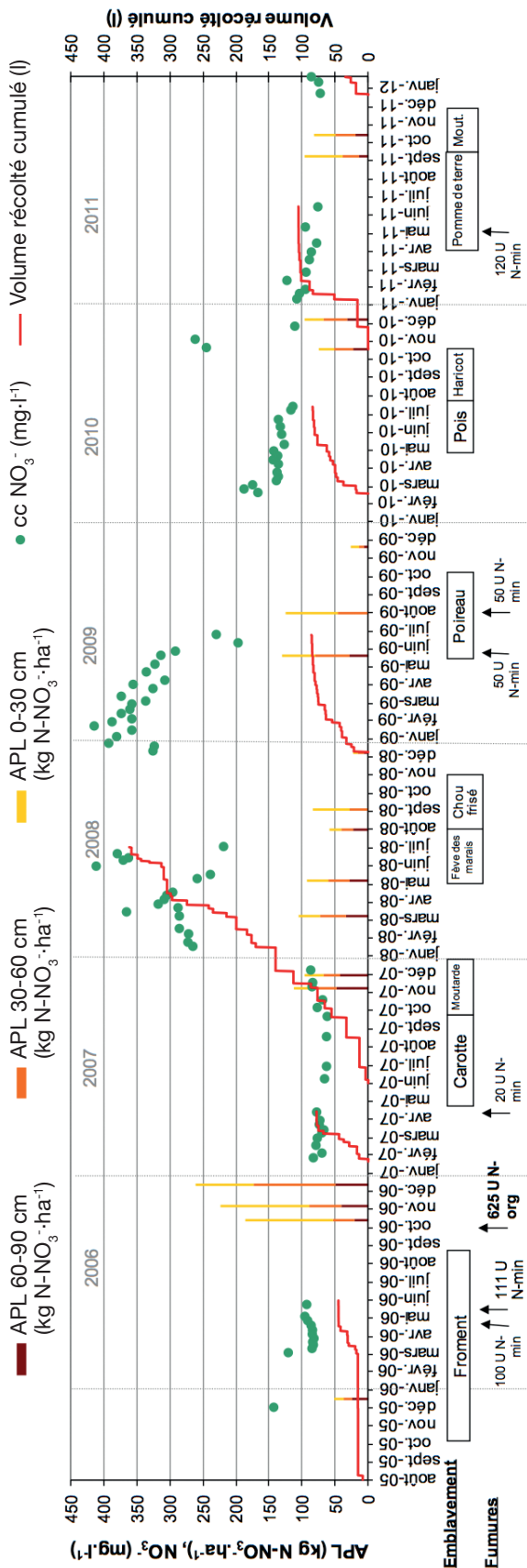


Figure 5. Impact sur la qualité de l'eau de percolation d'un apport excessif d'azote organique sous forme de compost (parcelle P2) — Impact of an excessive spreading of compost on water quality (plot P2).

se retrouveront *in fine* dans les eaux souterraines, et ce malgré une fertilisation raisonnée, voire réduite, dans le cadre d'une expérimentation au cours des quatre années qui ont suivi cet apport (120 kg N·ha⁻¹ au total sur ces quatre années).

Enfin, une autre parcelle (P6) fait l'objet d'un apport régulier (tous les deux ans) de matière organique (compost, fumier de bovin), en respect des plafonds d'épandage définis dans le PGDA. Depuis la mise en place du lysimètre dans cette parcelle en aout 2009, un froment suivi de CIPAN, une betterave et un pois y ont été cultivés (Tableau 2). Il apparait que les concentrations en nitrate dans l'eau de ce lysimètre étaient faibles au cours des hivers 2009-2010 (34 mg NO₃⁻·l⁻¹ en moyenne) et 2010-2011 (15 mg NO₃⁻·l⁻¹ en moyenne). Pour ce type de cultures et avec une fertilisation minérale raisonnée, des apports limités de matière organique (en accord avec les prescriptions du PGDA) sont donc compatibles avec l'obtention d'une qualité de l'eau de percolation tout à fait acceptable.

3.3. Essais d'implantation de CIPAN en interculture courte

Les résultats des trois essais d'implantation de CIPAN en interculture courte (après pois, haricot et pomme de terre) sont présentés au tableau 3. Ces trois essais concernaient l'implantation d'un nyger après récolte de pois, d'une avoine brésilienne après récolte de haricot et d'une moutarde après récolte de pomme de terre, avant le semis d'un froment en octobre. Dans ces trois essais menés en 2009 et 2011, le reliquat azoté a significativement augmenté entre la mesure en post-récolte et celle du mois d'octobre dans le cas du sol nu (augmentation chiffrée entre + 54 kg N-NO₃⁻·ha⁻¹ et + 126 kg N-NO₃⁻·ha⁻¹). En revanche, l'implantation de CIPAN, même pour une durée relativement courte, a permis de limiter l'augmentation d'APL causée par la minéralisation des résidus de culture, voire de diminuer celui-ci. Les CIPAN implantées dans de bonnes conditions (de sol, climatiques, etc.) se sont donc montrées efficaces (différences toujours significatives) pour prélever des quantités parfois conséquentes de nitrate, même sur une durée considérée comme courte.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les lysimètres mis en place depuis huit ans dans des sols limoneux profonds ont montré leur efficacité pour assurer un suivi qualitatif et quantitatif de la lixiviation du nitrate en relation avec les pratiques culturales. L'originalité de l'approche a consisté à implanter ces lysimètres sous des terres agricoles, en conditions réelles d'exploitation et sans gêne pour les opérations culturales.

Tableau 3. Résultats des essais d'implantation de CIPAN en intercultures courtes — *Results of the experiments on catch crop introduction during short intercropping periods.*

	Reliquat azoté post-récolte (kg N-NO ₃ ⁻ ·ha ⁻¹)		APL (kg N-NO ₃ ⁻ ·ha ⁻¹)		
	Date	Quantité	Date	Sol nu	CIPAN
Essai 1 : pois - (nyger)	01/08/2011	126	19/10/2011	188	64
Essai 2 : haricot - (avoine)	18/08/2009	66	13/10/2009	192	100
Essai 3 : pomme de terre - (moutarde)	08/09/2011	96	13/10/2011	150	82

Les lysimètres récoltent une fraction de la pluviométrie représentative de la quantité d'eau en voie de migration vers les eaux souterraines et sont donc fonctionnels d'un point de vue hydrologique.

Conformément aux objectifs de l'étude, l'outil lysimétrique a permis d'apporter un éclairage sur la relation existant entre les valeurs d'APL mesurées à l'automne et la qualité de l'eau de percolation qui en résulte. Il a ainsi été possible de valider l'APL en tant qu'indicateur de la concentration en nitrate de l'eau de percolation récoltée à 2 m de profondeur de six à dix-huit mois plus tard.

Installés dans des parcelles où grandes cultures classiques et cultures légumières industrielles se succèdent, les lysimètres ont contribué à l'étude de l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux. Ils ont démontré que la qualité de l'eau de percolation doit être appréhendée selon une approche globale et intégrée des successions et rotations culturales complètes. Des constats de successions culturales favorables ou défavorables à la qualité des eaux ont été dressés. Il a également été montré que le non-respect des plafonds d'épandage d'azote organique définis dans le PGDA était à même de dégrader significativement et durablement la qualité de l'eau migrant en profondeur.

Les observations réalisées au cours de cette étude nous amènent à dire que les lysimètres constituent un outil efficace pour l'évaluation et l'adaptation de la législation en matière de gestion de l'azote à l'échelle parcellaire. À l'avenir, il serait cependant envisageable d'étendre le champ d'investigation de cet outil à d'autres aspects de la qualité de l'eau que le seul ion nitrate. Sur base des résultats d'un screening phytosanitaire complet (plus de 100 molécules recherchées) réalisé sur deux échantillons d'eau, celui-ci semble particulièrement adapté à l'étude de la dynamique de migration des produits phytosanitaires en profondeur.

Enfin, des essais menés entre autres sur des parcelles équipées d'un lysimètre ont montré l'efficacité de CIPAN semées en interculture courte (après pois et haricot notamment) pour prélever des quantités importantes de nitrate et donc limiter l'APL avant le semis d'un froment.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements au Service Public de Wallonie (DGO3) pour le financement de l'étude, ainsi qu'aux agriculteurs participant au projet pour leur collaboration.

Bibliographie

- Cellule État de l'Environnement Wallon, 2007. *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*. Namur, Belgique : MRW – DGRNE.
- Dautrebande S. & Dewez A., 1996. *Programme Action-Hesbaye, rapport scientifique*. Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques, Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole.
- Deneufbourg M. et al., 2010a. *Adaptation des pratiques agricoles en fonction des exigences de la Directive Nitrates et validation des résultats via le suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique. Rapport final. Période du 1^{er} janvier 2008 au 30 juin 2010*. Gembloux, Belgique : Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.
- Deneufbourg M. et al., 2010b. *Adaptation des pratiques agricoles en fonction des exigences de la Directive Nitrates et validation des résultats via le suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique. Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **14**(S1), 113-120.
- Deneufbourg M., Vandenberghe C., Heens B. & Marcoen J.M., 2012. *Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique et expérimentation en matière de fertilisation azotée et de successions culturales en cultures industrielles légumières. Rapport intermédiaire, février 2012. Convention Service Public de Wallonie n°3523/4*. Gembloux, Belgique : Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.
- Fonder N., Vandenberghe C., Xanthoulis D. & Marcoen J.M., 2005. *Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture. Rapport final. Convention Région wallonne DGA n°3523/1. Période du 1^{er} mars 2003 au 28 février 2005*. Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques.
- Fonder N. et al., 2007. *Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable*

- de l'Azote (PGDA) en agriculture. Rapport final. Convention Région wallonne DGA n°3523/2. Période du 1^{er} mars 2005 au 31 mai 2007.* Gembloux, Belgique : Faculté universitaire des Sciences agronomiques.
- Fonder N. et al., 2010. Suivi de la percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **14**(S1), 17-25.
- Goss M.J., Ehlers W. & Unc A., 2010. The role of lysimeters in the development of our understanding of processes in the vadose zone relevant to contamination of groundwater aquifers. *Phys. Chem. Earth*, **35**(15-18), 913-926.
- Heens B., 2013. Fertilisation azotée des légumes industriels. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **17**(S1), 207-214.
- Müller J.-C., 1996. *Un point sur trente ans de lysimétrie en France (1960-1990)*. Paris : INRA, COMIFER.
- Vandenberghe C., 2010. Mise en relation de l'évolution de l'agriculture et de la qualité de l'eau entre 1950 et 2000. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **14**(S1), 9-16.
- Vandenberghe C. et al., 2013. Contrôle de l'azote potentiellement lessivable dans le sol en début de période de lixiviation. Établissement des valeurs de référence. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **17**(S1), 231-236.

(13 réf.)