

Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en Agriculture



Ce document doit être cité de la manière suivante :

Lefébure K., Vandenberghe C., Bachelart F., Colinet G. 2017. *Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en Agriculture*. Dossier GRENeRA **17-04**. 33p. In Vandenberghe C., De Toffoli M., Limbourg Q., Bachelart F., Imbrecht O., Bah B., Lefébure K., Huyghebaert B., Lambert R., Colinet G., 2017 *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne et volet eau du programme wallon de réduction des pesticides – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2017 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement PROTECT'eau*. Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, Université catholique de Louvain et Centre wallon de Recherches agronomiques, 33 p. + annexes.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	3
2. CONTEXTE	3
3. DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE.....	4
4. CONDITIONS CLIMATIQUES.....	6
5. MISE À JOUR DES OBSERVATIONS DANS LES EAUX DE PERCOLATION 2016-2017	9
5.1. GROSSE PIERRE CHEMIN DE FER.....	9
5.1.1. Calendrier cultural.....	9
5.1.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats.....	9
5.2. GROS THIER BOVENISTIER.....	11
5.2.1. Calendrier cultural.....	11
5.2.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats.....	11
5.3. SOLE 4	13
5.3.1. Calendrier cultural.....	13
5.3.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats.....	13
5.4. HAUTE BOVA	15
5.4.1. Calendrier cultural.....	15
5.4.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats.....	15
5.5. REGARD SUR LES FLUX D'EAU	16
6. BILANS PLURIANNUELS	17
6.1. INTRODUCTION.....	17
6.2. GROSSE PIERRE CHEMIN DE FER.....	17
6.3. GROS THIER BOVENISTIER.....	21
6.4. SOLE 4	25
6.5. HAUTE BOVA	28
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	31
8. BIBLIOGRAPHIE.....	33

1. Introduction

Depuis le milieu des années 1970, la concentration en nitrate dans les eaux souterraines a significativement augmenté en Wallonie (Vandenbergh, 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 à la pomme de terre, diminution des superficies de prairie, augmentation de l'utilisation d'azote minéral et organique), les secteurs « industriel » et « domestique » ayant également eu un impact sur celle-ci.

La surveillance de la qualité des eaux en Wallonie est organisée au travers du « Survey Nitrate » (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007) qui est constitué de près d'un millier de points d'observation dans les eaux souterraines. 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 pour tel ou tel secteur d'activités (agricole, industriel ou domestique).

Par ailleurs, le transit du nitrate dans la zone insaturée constitue une véritable inconnue du système 'sol'. L'utilisation de lysimètres s'est révélée être un outil efficace pour lever partiellement et dans un délai raisonnable cette inconnue. La méthode lysimétrique permet ainsi 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 produits phytosanitaires, le nitrate ou les micro-organismes notamment (Muller J-C., 1996 ; Goss et al, 2010).

2. Contexte

En 2003, six lysimètres ont été mis en place sur des parcelles agricoles en Hesbaye, région à vocation principalement légumière. Ces lysimètres permettent le suivi qualitatif et quantitatif de la lixiviation du nitrate au-delà de la zone racinaire. Ce suivi a pour objectifs 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 d'épandage et des références APL¹ (Vandenbergh *et al.*, 2016) définies dans le cadre du 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 un éclairage et des conseils sur les pratiques et rotations culturales adéquates en termes de respect de la qualité de l'eau et celles qui sont à revoir ou à éviter.

Cette étude a fait l'objet de quatre conventions de recherche entre 2003 et 2013, exécutées par GRENeRA (Unité Echanges Eau-Sol-Plante – Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech) en collaboration avec l'ASBL Epuvaleau et l'ASBL Centre Provincial Liégeois des Productions Végétales et Maraîchères (CPL Végémar)². La dernière convention (2010-2013) s'intitulait « Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique et expérimentation en matière de fertilisation azotée et de successions culturales en cultures industrielles légumières » (Deneufbourg *et al.*, 2013) et a été financée par le Service Public de Wallonie (DGO3).

¹ Azote Potentiellement Lessivable.

² Rapports disponibles sur www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/grenera_rapports_activites_lysimetres.htm.

Plusieurs expérimentations ont ainsi été menées à l'aplomb des lysimètres afin de tester l'impact d'une réduction des niveaux de fertilisation d'une part et de l'introduction de Cultures Intermédiaires Piège à Nitrate (CIPAN) dans la rotation d'autre part sur les rendements des cultures, le reliquat azoté du sol et la concentration en nitrate dans l'eau qui percole sous la zone racinaire.

Les lysimètres exploités depuis 2003 ont montré leur efficacité pour assurer le suivi de la lixiviation de l'azote nitrique en relation avec les pratiques agricoles (Deneufbourg *et al.*, 2013). Ils récoltent une fraction de la pluviométrie représentative de la quantité d'eau en voie de migration vers les eaux souterraines et permettent d'en faire un suivi qualitatif et quantitatif. Les lysimètres ont également apporté un éclairage sur la relation existant entre l'APL et la qualité de l'eau de percolation qui en résulte ; ils ont ainsi montré que l'indicateur environnemental APL donne une tendance correcte sur la quantité de nitrate qui sera présente l'année suivante dans les eaux de percolation à une profondeur où il ne sera pas récupérable par la culture suivante. Les valeurs mesurées en termes de lixiviation d'azote nitrique montrent la nécessité et la pertinence des normes d'épandage et du code de bonnes pratiques agricoles. Par ailleurs, l'outil lysimétrique a clairement mis en évidence que la qualité des eaux de percolation sous les terres agricoles doit être appréhendée selon une approche globale et intégrée des rotations et successions culturelles complètes, en ce compris la fertilisation raisonnée et les CIPAN adaptées à chaque culture présente dans la rotation.

*Nous renvoyons au rapport d'activité final (Deneufbourg *et al.*, 2013)³ des études précédentes pour l'ensemble des résultats, interprétations et conclusions.*

3. Description des sites d'étude

Les sites d'étude sont localisés à Waremme (Hesbaye). Les lysimètres de Waremme sont installés au sein de trois exploitations agricoles faisant partie du « Survey Surfaces Agricoles », réseau de 41 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 références APL (Vandenbergh *et al.*, 2016). Ces parcelles sont également suivies par le CPL Végémar⁴ qui contribue notamment à la gestion du périmètre irrigué à partir des eaux usées de l'usine de surgélation et de conditionnement de légumes Hesbaye Frost s.a.

Cinq lysimètres ont été implantés dans des parcelles irrigables intégrant des cultures légumières industrielles en rotation avec les grandes cultures classiques et un lysimètre est implanté dans une parcelle non irrigable (Haute Bova) cultivée uniquement de grandes cultures classiques (céréales, betterave, chicorée, pois) avec apport régulier de matière organique.

Les parcelles dans lesquelles sont installés les lysimètres de Waremme sont dénommées selon les noms utilisés par les agriculteurs et le CPL Végémar, soit Grosse Pierre Chemin de Fer, Gros Thier Bovenistier, Haute Bova, PL1, PL3 et Sole 4 (figure 1 et figure 2).

Les sols caractéristiques des parcelles dans lesquelles sont installés les lysimètres sont des limons profonds à drainage favorable. Chaque site a été caractérisé d'un point de vue pédologique par un sondage à la tarière, jusqu'à la profondeur de 2m (Fonder *et al.*, 2005).

Historiquement, deux lysimètres ont également été suivis à Gembloux (Bah *et al.* 2016).

³ Disponible sur http://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1_fichiers/Rap_activites/Lysimetre/Rapport_final_2013.pdf.

⁴ Centre Provincial Liégeois de Productions végétales et maraîchères

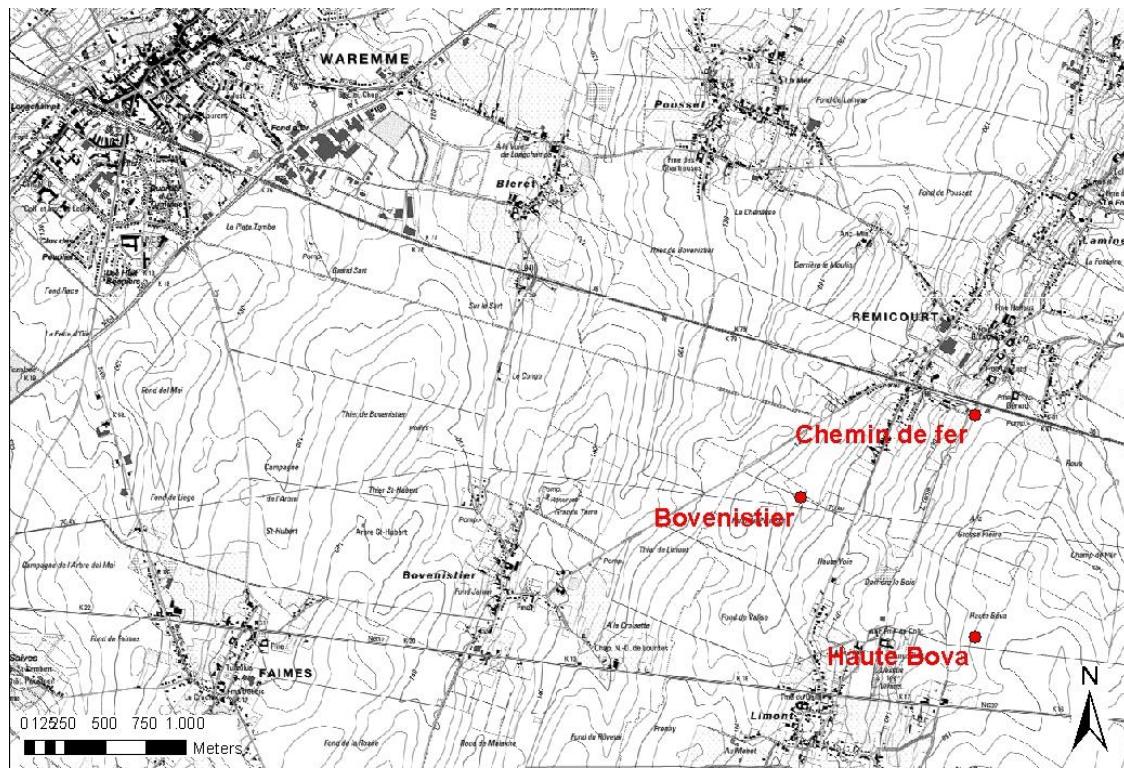


Figure 1. Carte de localisation des lysimètres Grosse Pierre Chemin de Fer, Gros Thier Bovenistier et Haute Bova.

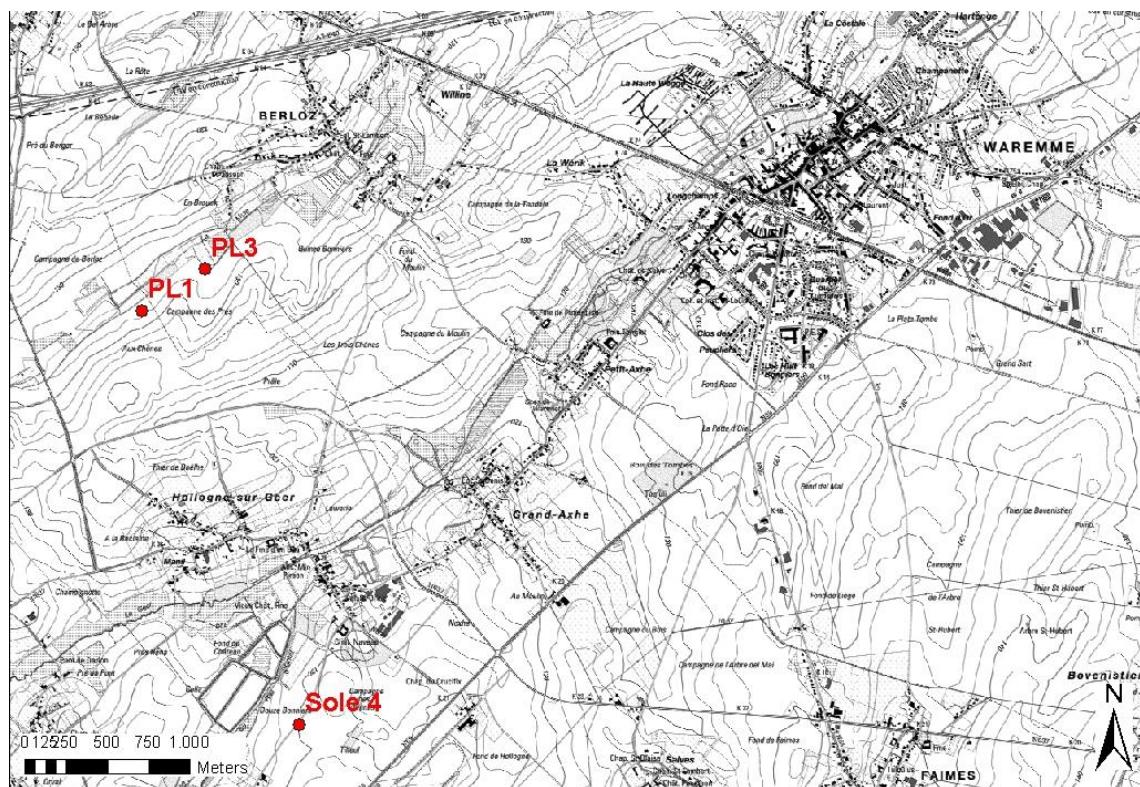


Figure 2. Carte de localisation des lysimètres PL1, PL3 et Sole 4.

4. Conditions climatiques

Les données météorologiques (température moyenne mensuelle et précipitations) mesurées aux stations météos d'Uccle-Bruxelles de l'IRM⁵ et de Bierset⁶ de juillet 2016 à décembre 2017 sont reprises au tableau 1. Actuellement, les bulletins de l'IRM n'ont pas encore été entièrement diffusés. C'est pourquoi, les relevés météorologiques de la station de Bierset ne sont pas complets. Sur la période allant de juillet 2016 à mars 2017, les températures moyennes mensuelles des deux stations ne sont généralement différentes que de quelques dixièmes de degré. Les précipitations moyennes mensuelles montrent de plus grandes différences entre les deux stations. Elles sont donc liées à des phénomènes plus locaux. Faute de données plus précises, les données météorologiques de la station d'Uccle sont utilisées pour discuter les conditions météorologiques de la saison 2016 – 2017.

Le diagramme ombrothermique construit à partir de ces valeurs est présenté à la figure 3.

Tableau 1. Données météorologiques mensuelles aux stations de mesure d'Uccle (juillet 2016 – décembre 2017).

Mois	Température moyenne mensuelle (°C)		Uccle Précipitations mensuelles (mm)	
	Uccle	Bierset	Uccle	Bierset
juil-16	18,3	18,7	55,1	38,1
août-16	18,1	18,6	54,1	43,6
sept-16	17,5	18,1	18,3	14,3
oct-16	9,7	9,5	50,7	53,5
nov-16	6,1	5,9	93,2	52,8
déc-16	4,7	4,4	22,7	18,4
janv-17	1,1	0,2	63,7	35
févr-17	6,1	5,7	40,9	50,5
mars-17	9,6	9,2	47,7	42
avr-17	8,8		15,2	
mai-17	15,5		45,1	
juin-17	19,2		50,8	
juil-17	18,4		58,3	
août-17	18,1		70,8	
sept-17	14,1		77,5	
oct-17	13,3		43,1	
nov-17	6,6		105,9	
déc-17	4,4		130,1	

⁵ Institut Royal Météorologique. Source des données : <http://www.meteo.be/meteo/view/fr/1124386-Bilan+climatologique+mensuel.html>

⁶ Consultation des bulletin mensuel de l'IRM (Bibliothèque GxABT – 11 mai 2018)

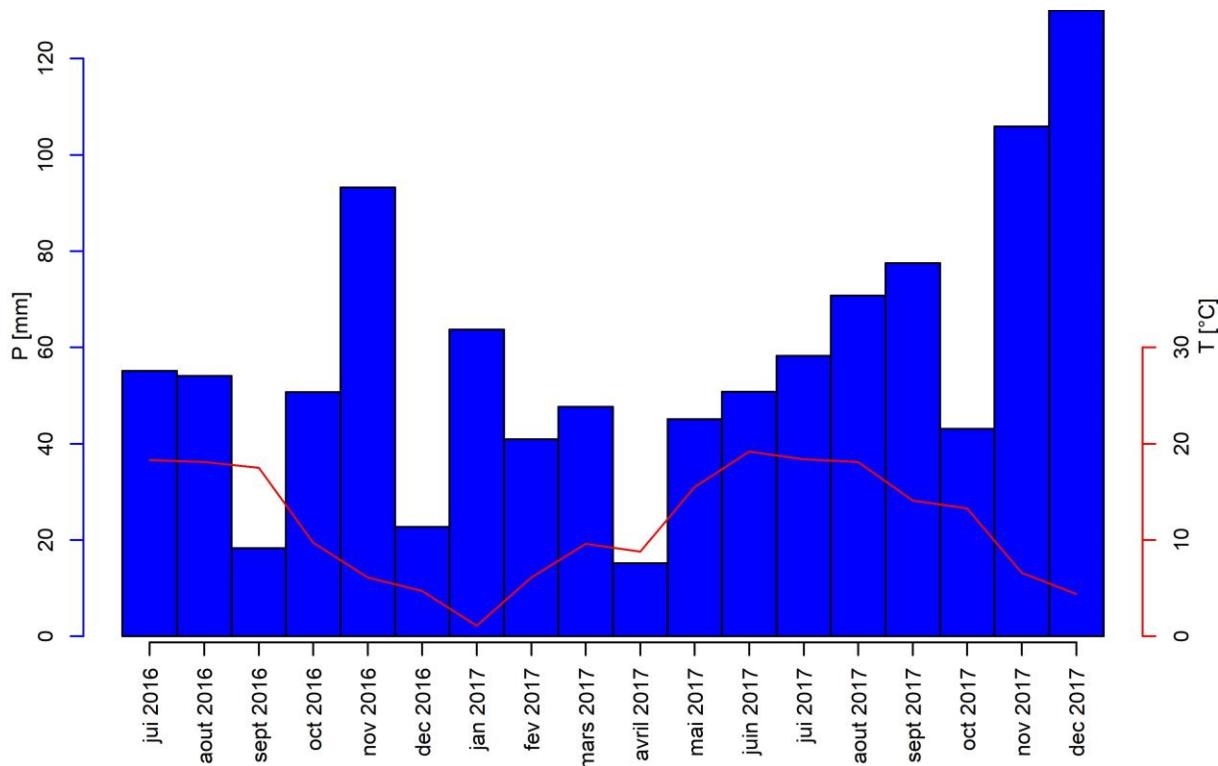


Figure 3. Précipitations et températures moyennes mensuelles (juillet 2016 – décembre 2017) à la station d'Uccle (d'après l'IRM – Institut Royal météorologique).

Selon les informations présentées sur le site de l'IRM⁷, les températures, les précipitations, le nombre de jours de précipitations et l'insolation moyenne durant l'été 2016 sont qualifiés de « normaux » c'est-à-dire que la période de retour (T) est inférieure à 6 ans.

Les caractéristiques météorologiques de l'automne 2016 sont aussi qualifiées de normales.

Les températures moyennes et le nombre de jours de précipitation sont aussi qualifiés de normaux durant l'hiver 2016-2017. Par contre, les précipitations et l'insolation sont respectivement qualifiées de très anormalement (T > 10 ans) et anormalement (T > 6 ans) faibles.

Le printemps 2017 est plus sec et plus chaud que la moyenne. Les températures moyennes et le nombre de jours de précipitation sont qualifiés d'anormaux, l'insolation est normale et les précipitations sont très anormalement faibles.

Les caractéristiques météorologiques de l'été 2017 sont qualifiées de normales sauf les températures moyennes qui sont anormalement chaudes.

Les caractéristiques météorologiques de l'automne 2017 sont qualifiées de normales sauf le nombre de jours de précipitation qui est anormalement important.

Enfin, les caractéristiques météorologiques de l'hiver 2017-2018 sont qualifiées de normales.

⁷ <https://www.meteo.be/meteo/view/frs>

La somme des précipitations tombées à Uccle durant la période allant de juillet 2016 à décembre 2017 est de 1043,2 mm. L'évapotranspiration potentielle (ETP) peut être estimée par la formule empirique de Thornthwaite (1948) qui ne nécessite que la connaissance de la température moyenne mensuelle. Sur cette même période, elle est de 1105,6 mm. D'octobre 2016 à mars 2017 et durant les mois de septembre, novembre et décembre 2017, les précipitations mensuelles sont supérieures à l'ETP (figure 4).

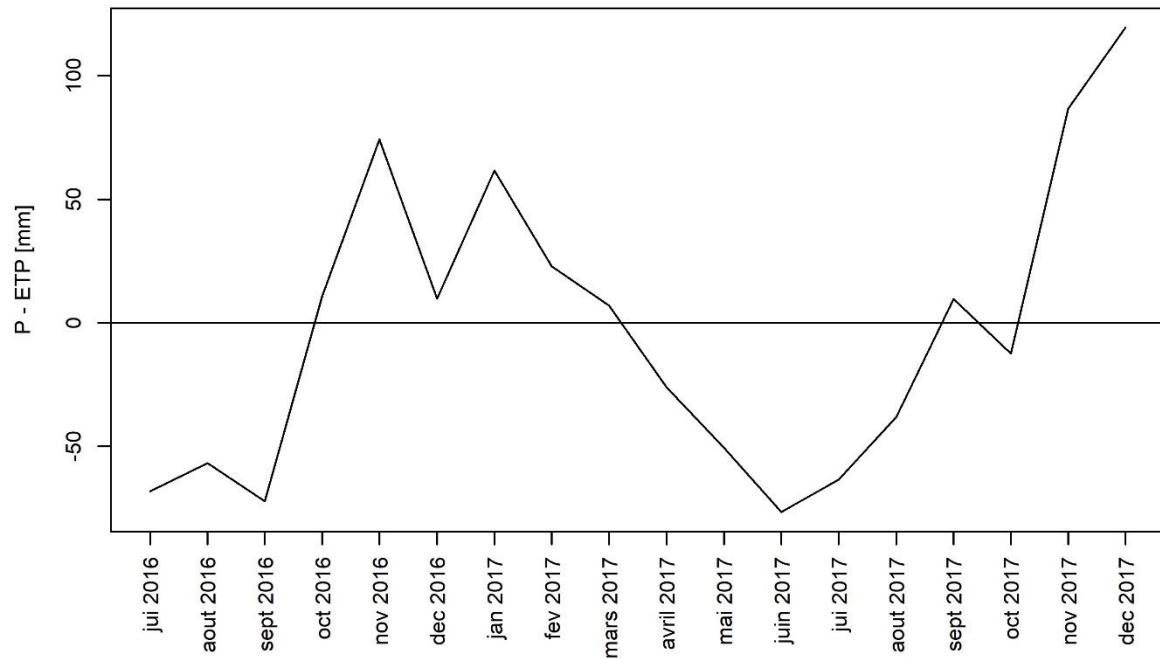


Figure 4. Évolution du déficit hydrique mensuel entre juillet 2016 et décembre 2017.

5. Mise à jour des observations dans les eaux de percolation 2016-2017

Depuis juin 2013, quatre des six lysimètres situés dans la région de Waremme ont fait l'objet d'un suivi (bi-)mensuel. Ces lysimètres sont dénommés « Grosse Pierre Chemin de fer », « Gros Thier Bovenistier », « Sole 4 » et « Haute Bova ». Les observations réalisées pour la saison de drainage 2016-2017 sont présentées ci-après.

5.1. Grosse Pierre Chemin de fer

Ce lysimètre de type remanié a été installé le 4 juillet 2003.

5.1.1. Calendrier cultural

Novembre 2014 : labour

24 avril 2015 : apport de 45 kg N minéral ha^{-1}

Début mai 2015 : semis de fèves

Juillet 2015 : semis épinard

15 juillet 2015 : apport de 80 kg N minéral ha^{-1}

13 août 2015 : apport de 73 kg N minéral ha^{-1}

Novembre 2015 : semis de froment

18 mars 2016 : apport de 59 kg N minéral ha^{-1}

13 avril 2016 : apport de 50 kg N minéral ha^{-1}

11 mai 2016 : apport de 60 kg N minéral ha^{-1}

Aout 2016 : récolte du froment

1^{er} septembre 2016 : 15 T de digestat à 0,5 % soit 75 kg N ha^{-1}

1^{er} septembre 2016 : semis d'une CIPAN (moutarde)

Novembre 2016 : labour

Printemps 2017 : semis de pois

5.1.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats

Le tableau 2 renseigne les volumes d'eau récoltés ainsi que les résultats d'analyse des eaux de percolation à l'exutoire du lysimètre « Grosse Pierre Chemin de fer », pour la période comprise entre septembre 2016 et juin 2017. Le volume total récolté au cours de cette période est de 81,7 litres, soit 18,2 % de la pluviométrie mesurée à Uccle durant cette même période de drainage.

Exceptionnellement, la saison de drainage 2015-2016 avait été prolongée d'un mois suite aux précipitations exceptionnelles du mois de juin 2016. C'est pourquoi les flux d'eau et de nitrate de la saison de drainage 2016-2017 ne sont comptabilisés qu'à partir du mois de septembre 2016. Les conditions météorologiques du printemps 2017 (faibles précipitations et températures relativement élevées) ont conduit à un tarissement du lysimètre dès le mois de juin 2017.

Tableau 2 : Parcalle Grosse Pierre Chemin de Fer, observations mensuelles des volumes percolés et concentrations en nitrate au cours de la période de drainage 2016-2017.

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (l) ⁸	Concentration moyenne mensuelle (mg NO ₃ ⁻ l ⁻¹)	Quantité d'azote nitrique lixivié (kg N·NO ₃ ⁻ ha ⁻¹)
Septembre 2016	18,3			
Octobre	50,7			
Novembre	93,2			
Décembre	22,7			
Janvier 2017	63,7			
Février	40,9	23,8	5,6	0,3
Mars	47,7	51,6	5,6	0,7
Avril	15,2			
Mai	45,1	5,7	19,9	0,3
Juin	50,8	0,6	25,7	0,0
DRAINAGE 2016-2017	448,3	81,7	6,7^(*)	1,2

(*) Moyenne pondérée par les volumes récoltés

La teneur moyenne en nitrate dans l'eau de drainage observée durant la saison 2016-2017 (6,7 mg NO₃⁻ l⁻¹) (tableau 2) est inférieure à celle observée durant les saisons précédentes (respectivement 44,0 et 26,8 mg NO₃⁻ l⁻¹) et à la dernière mesure de la période de lixiviation 2015-2016. Elle était alors de 99,8 mg NO₃⁻ (Bah et al., 2016). Cette importante concentration en nitrate laissait à penser que les APL élevés observés en hiver 2015 (respectivement 36 et 112 en octobre et en décembre) marquaient leurs premiers effets négatifs sur la qualité de l'eau dès la fin de la saison de drainage 2015-2016 et qu'une augmentation de la concentration en nitrate dans l'eau durant la saison de drainage 2016-2017 était à prévoir. À postériori, on constate que l'augmentation de la concentration en nitrate 'attendue' n'a pas eu lieu.

Les faibles précipitations observées durant les mois de décembre 2015, janvier et février 2016 ont limité les flux de nitrate vers les eaux souterraines. Le froment en place a certainement dû prélever une partie de ce stock à partir du printemps 2016. Lors de la saison de drainage 2016-2017, les précipitations ont été inférieures aux précipitations « normales » (448,3 mm contre 699,6 mm à Uccle)⁹. Les infiltrations d'eau sont faibles, ce qui conduit par ailleurs à une faible lixiviation d'azote nitrique.

Il faut rappeler que les observations APL reflètent une valeur moyenne de la parcelle mais qu'aucune mesure n'est effectuée dans le lysimètre car des flux préférentiels seraient créés. Il se pourrait que l'APL au droit du lysimètre soit, en réalité plus faible.

L'APL mesuré à deux reprises dans la couche 0-90 cm à l'automne 2016 (tableau 3) montre des faibles valeurs d'APL (20 et 22 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ respectivement en octobre et décembre 2016). Ces faibles valeurs d'APL s'expliquent (1) par le type de culture : le froment qui laisse généralement un faible reliquat azoté post-récolte grâce à son système racinaire performant et (2) par la présence d'une CIPAN (moutarde) qui a prélevé le produit post récolte par la minéralisation de la matière organique du sol et de l'apport de digestat.

Tableau 3. APL (kg N-NO₃⁻ ha⁻¹) sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer en 2016.

	26/10/2016	1/12/2016
0-30 cm	9	9
30-60 cm	7	8
60-90 cm	4	5
total	20	22

⁸ Par mètre carré de lysimètre.

⁹ <https://www.meteo.be/>

5.2. Gros Thier Bovenistier

Ce lysimètre de type non remanié a été installé le 14 août 2003.

5.2.1. Calendrier cultural

Novembre 2014 : semis de froment

6 mars 2015 : apport azoté de 60 kg N minéral ha^{-1}

24 avril 2015 : apport azoté de 50 kg N minéral ha^{-1}

13 mai 2015 : apport azoté de 70 kg N minéral ha^{-1}

18 août 2015 : apport de 15 tonnes de digestat (83 kg N minéral ha^{-1})

Fin août 2015 : semis moutarde/phacélie

Décembre 2015 : labour

Mai 2016 : semis de fèves

11 mai 2016 : apport de 39 kg N minéral ha^{-1}

Août 2016 : semis d'épinard

6 août 2016 : apport azoté de 100 kg N minéral ha^{-1}

2 septembre 2016 : apport azoté de 45 kg N minéral ha^{-1}

Octobre 2016 : semis moutarde

Avril 2017 : Semis de lin

5.2.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats

Sur le lysimètre « Gros Thier Bovenistier », les précipitations du mois de juin 2016 n'ont pas conduit à une infiltration durant le mois d'août 2016, contrairement au lysimètre « Grosse Pierre Chemin de fer ». La saison de drainage 2016-2017 commence donc en août 2016. Les faibles précipitations de l'été 2017 ont conduit à un tarissement du lysimètre à partir du mois de juin 2017.

Le tableau 4 renseigne les volumes d'eau récoltés ainsi que les résultats d'analyse des eaux de percolation à l'exutoire du lysimètre parcelle « Gros Thier Bovenistier », pour la période comprise entre août 2016 et juin 2017. Le volume total récolté au cours de cette période est de 29,5 litres, soit 5,9 % de la pluviométrie mesurée à Uccle durant cette même période de drainage.

Durant la saison de drainage 2016-2017, la concentration en nitrate dans l'eau de percolation est faible. On observe toutefois une augmentation de la concentration à la fin de la saison de drainage. Elle pourrait être le signe d'un biais (concentration du nitrate par évaporation,...), plus marqué sur les faibles volumes. Cette hypothèse fera l'objet d'une courte vérification en 2018.

Une autre explication pourrait être la diffusion de nitrate à flux (quasi) constant des petits capillaires du sol vers les gros capillaires. Lorsque le débit des gros capillaires est important, le flux de nitrate en provenance des petits capillaires est fortement dilué. A l'inverse, lorsque le flux d'eau dans les gros capillaires est faible, l'impact du flux de nitrate provenant des petits capillaires est plus important.

Tableau 4. Parcelle Gros Thier Bovenistier, observations mensuelles des volumes percolés et concentrations en nitrate au cours de la période de drainage 2016-2017.

Mois	Pluviométrie	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(l)	(mg NO ₃ ⁻ l ⁻¹)	(kg N-NO ₃ ⁻ ha ⁻¹)
Août 2016	54,1			
Septembre	18,3			
Octobre	50,7			
Novembre	93,2			
Décembre	22,7			
Janvier 2017	63,7			
Février	40,9	2,4	5,6	0,0
Mars	47,7	25	6,7	0,4
Avril	15,2			
Mai	45,1	1,9	15	0,1
Juin	50,8	0,2	24,3	0,0
DRAINAGE 2015-2016	502,4	29,5	7,3^(*)	0,5

(*) Moyenne pondérée par les volumes récoltés

L'APL mesuré dans la couche 0-90 cm de la parcelle à l'automne 2016 (tableau 5) montre des valeurs de 105 et 39 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ respectivement en octobre et décembre 2016. L'importante valeur d'APL d'octobre s'explique d'une part par les cultures de 2016 : fèves et épinards et d'autre part par la fertilisation. Les fèves apportent une importante quantité d'azote dans le sol par symbiose avec des bactéries ce qui aurait certainement pu suffire pour la culture d'épinards.

Durant la période allant du 25 octobre 2016 au 6 décembre 2016, on observe une diminution de l'APL d'environ 65 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ qui peut résulter (1) d'un prélèvement d'azote par la moutarde ou (2) dans une moindre mesure, de la lixiviation d'une partie de l'azote nitrique. En effet, l'infiltration efficace est positive durant le mois de novembre 2016 (figure 4 au § 4).

Tableau 5. APL (kg N-NO₃⁻ ha⁻¹) sur la parcelle Gros Thier Bovenistier en 2016.

	25/10/2016	6/12/2016
0-30 cm	37	15
30-60 cm	33	11
60-90 cm	35	13
total	105	39

5.3. Sole 4

Ce lysimètre de type remanié a été installé en date du 8 août 2003.

5.3.1. Calendrier cultural

Novembre 2014 : récolte de maïs + labour

Avril 2015 : plantation de pomme de terre

25 avril 2015 : apport azoté de 170 kg N minéral ha^{-1}

Novembre 2015 : semis de froment

20 mars 2016 : apport de 48 kg N minéral ha^{-1}

10 avril 2016 : apport de 82 kg N minéral ha^{-1}

20 mai 2016 : apport de 55 kg N minéral ha^{-1}

Septembre 2016 : 25 T fumier bovin à 0,59 % soit 147 kg N ha^{-1}

Septembre 2016 : semis de facélie

Mars 2017 : Semis de betteraves

5.3.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats

Sur le lysimètre « Sole 4 », les précipitations du mois de juin 2016 n'ont pas conduit à une infiltration durant le mois d'août 2016, contrairement au lysimètre « Grosse Pierre Chemin de fer ». La saison de drainage 2017 commence donc en août. Les faibles précipitations du printemps 2017 ont conduit à un tarissement du lysimètre à partir du mois de juin 2017.

Au cours de la saison de drainage 2016-2017, 62,7 litres de percolat ont été récoltés (tableau 6), soit 12,5 % de la précipitation sur la même période. Le volume récolté est semblable à celui récolté durant la saison 2015-2016. Les faibles précipitations de la saison 2016-2017 et la capacité de prélèvement de la racine ont donc limité l'infiltration de l'eau.

Tableau 6. Parcelle Sole 4, observations mensuelles des volumes percolés et concentrations en nitrate au cours de la période de drainage 2016-2017.

Mois	Pluviométrie (mm)	Volumes récoltés (l)	Concentration moyenne mensuelle (mg $NO_3^- l^{-1}$)	Quantité d'azote nitrique lixivé (kg N- $NO_3^- ha^{-1}$)
Août 2016	54,1			
Septembre	18,3			
Octobre	50,7			
Novembre	93,2			
Décembre	22,7			
Janvier 2017	63,7			
Février	40,9	14,9	207,4	7,0
Mars	47,7	48,9	128,5	14,2
Avril	15,2			
Mai	45,1	7,3	169,3	2,8
Juin	50,8	0,5	205,3	0,2
DRAINAGE 2016-2017	502,4	62,7	149,6^(*)	24,2

(*) Moyenne pondérée par les volumes d'eau récoltés

La concentration moyenne en nitrate dans l'eau du lysimètre est élevée, environ de $150 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. Elle montre tout de même une nette amélioration depuis la saison de drainage précédente. La concentration en nitrate a montré une diminution d'environ 70 % (précédemment $547 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$). Cette importante diminution de la concentration en nitrate dans l'eau est le signe de bonnes pratiques agricoles, mises en évidence par de faibles valeurs d'APL en automne 2016 (tableau 7) qui témoignent d'une bonne gestion de l'azote (engrais et CIPAN).

Par son système racinaire profond, la culture de betterave installée en 2017 devrait permettre une amélioration continue la qualité de l'eau qui se marquera durant la saison 2017-2018.

Tableau 7. APL (kg N- $\text{NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$) sur la parcelle Sole 4 en 2016.

	25/10/2016	6/12/2016
0-30 cm	5	9
30-60 cm	4	2
60-90 cm	3	3
total	12	14

5.4. Haute Bova

Ce lysimètre de type remanié a été le dernier installé. Initialement positionné dans une parcelle située à proximité, il a été déplacé en août 2009.

5.4.1. Calendrier cultural

Novembre 2014 : semis de froment

11 mars 2015 : apport de 55 kg N minéral ha^{-1}

8 avril 2015 : apport de 55 kg N minéral ha^{-1}

11 mai 2015 : apport de 80 kg N minéral ha^{-1}

18 août 2015 : apport de 15 tonnes de boues (170 kg N minéral ha^{-1})

Fin août 2015 : semis CIPAN (moutarde)

Mi-février 2016 : destruction de la CIPAN

20 avril 2016 : apport de 60 kg N minéral ha^{-1}

Mai 2016 : plantation de pomme de terre (plants)

Octobre 2016 : semis de froment

14 avril 2017 : apport de 30 kg N minéral ha^{-1}

31 avril 2017 : apport de 40 kg N minéral ha^{-1}

21 mai 2017 : apport de 40 kg N minéral ha^{-1}

5.4.2. Synthèse des résultats d'analyse des percolats

Sur le lysimètre « Haute Bova », les précipitations du mois de juin 2016 ont conduit à une prolongation de la durée de la période 2015-2016 de lixiviation jusqu'en août 2016. La saison de drainage 2016-2017 commence donc en septembre 2016. Les faibles précipitations du printemps 2017 ont conduit à un tarissement du lysimètre à partir du mois de juin 2017.

Au cours de la saison de drainage 2016-2017, 92,4 litres de percolat ont été récoltés (tableau 8), soit 20,6 % de la précipitation sur la même période. La concentration moyenne en nitrate est de 135,6 mg $NO_3^- l^{-1}$. Elle a augmenté de 44,7 mg $NO_3^- l^{-1}$ par rapport à la concentration moyenne de la saison de drainage 2015-2016. Durant la saison 2015-2016, elle avait déjà subi une importante augmentation causée par la probable lixiviation de la fertilisation apportée sur les pommes de terre (Bah *et al.*, 2015). Depuis la saison 2014-2015, la concentration a augmenté de plus de 100 mg $NO_3^- l^{-1}$.

Tableau 8. Parcelle Haute Bova, observations mensuelles des volumes percolés et concentrations en nitrate au cours de la période de drainage 2015-2016.

Mois	Pluviométrie	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(l)	(mg NO ₃ ⁻ l ⁻¹)	(kg N- NO ₃ ⁻ ha ⁻¹)
Septembre 2016	18,3			
Octobre	50,7			
Novembre	93,2			
Décembre	22,7			
Janvier 2017	63,7			
Février	40,9	29,8	150,2	10,1
Mars	47,7	58,7	123,0	16,3
Avril	15,2			
Mai	45,1	3,5	212,7	1,7
Juin	50,8	0,3	241,6	0,2
DRAINAGE 2015-2016	448,3	92,4	135,6^(*)	28,3

(*) Moyenne pondérée par les volumes d'eau récoltés

Les APL de l'hiver 2016 (tableau 9) sont élevés. Les plants de pommes de terre ont été récoltés relativement tôt ce qui a conduit à une minéralisation importante de la matière organique. Le froment, semé en octobre 2016, n'a pas conduit une diminution sensible de l'APL.

Tableau 9. APL (kg N-NO₃⁻ ha⁻¹) sur la parcelle Haute Bova en 2016.

	25/10/2016	5/12/2016
0-30 cm	69	51
30-60 cm	34	41
60-90 cm	41	36
total	144	128

Les trois causes identifiées de cette augmentation sont :

1. lixiviation de l'apport sur pommes de terre (Bah et al., 2015),
2. minéralisation et lixiviation de l'azote post récolte,
3. lixiviation de l'azote produit par la minéralisation des boues apportées en août 2015.

5.5. Regard sur les flux d'eau

Au cours de l'hiver 2016-2017, les lysimètres ont récolté environ 90 litres d'eau, soit 90 mm d'infiltration (moyenne des 4 lysimètres). L'eau utile théorique (P-ETP) au cours de cette période est de l'ordre de 160 mm (figure 4, page 8). Cette différence (90 – 160) est principalement expliquée par le fait que nous avons dû établir le bilan P-ETP sur base des observations de la station météorologique de Uccle pour laquelle nous disposons des relevés de température pour toute l'année 2017 (indispensable pour l'estimation de l'ETP avec la relation empirique établie par Thornthwaite).

En se limitant aux observations de l'hiver 2016-2017, la station météorologique de Geer (plus proche des lysimètres) affiche une moindre pluviométrie d'environ 70 mm par rapport à la station de Uccle. L'eau utile théorique pour cette période n'est donc pas de 160 mm mais bien de 90 mm, valeur similaire à la moyenne des observations réalisées aux exutoires des quatre lysimètres.

Afin de « valider » la démarche, le même bilan a été établi pour l'hiver 2015-2016. Pour cette période, nous disposions des données nécessaires pour la station de Geer. L'eau utile théorique (P-ETP) pour cette période était de 180 mm (Bah et al., 2016 – figure 4) et la moyenne des volumes d'eau récoltés aux exutoires des quatre lysimètres était du même ordre de grandeur.

6. Bilans pluriannuels

6.1. Introduction

Comme évoqué précédemment, les lysimètres installés dans le périmètre irrigué de Waremmé ont une quinzaine d'années d'existence et celui situé en dehors de ce périmètre, dans une rotation plus classique, une huitaine d'années. Jusqu'à présent, les réflexions avaient principalement porté sur des aspects de concentration en nitrate et sur la relation culture – APL – concentration ($\text{mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$). L'ancienneté des lysimètres nous permet aujourd'hui de porter un autre regard sur les observations et résultats : l'impact des successions culturales sur les flux d'azote ($\text{kg NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$).

6.2. Grosse Pierre Chemin de fer

La figure 5 présente l'évolution de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation récoltée à la base du lysimètre « Grosse Pierre Chemin de fer » (moyenne mensuelle), le suivi de la concentration en nitrate dans le sol [APL, reliquats sorties d'hiver (RSH), échantillonnages d'été] ainsi que le flux d'eau cumulé par saison de drainage. La concentration (moyenne mensuelle) en nitrate dans l'eau de percolation fluctue entre 5,6 $\text{mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ en février 2017 et 408,3 $\text{mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ en juin 2008. D'une année à l'autre, les volumes d'eau récoltés varient fortement. Durant la saison de drainage 2011-2012, 36 l ont été récoltés alors que 348,8 l ont été récoltés durant la saison de drainage 2007-2008. Cette variation est expliquée par les conditions météorologiques (précipitation et évapotranspiration), la profondeur racinaire des cultures présentes en hiver et en été et par les volumes d'eau apportés par irrigation.

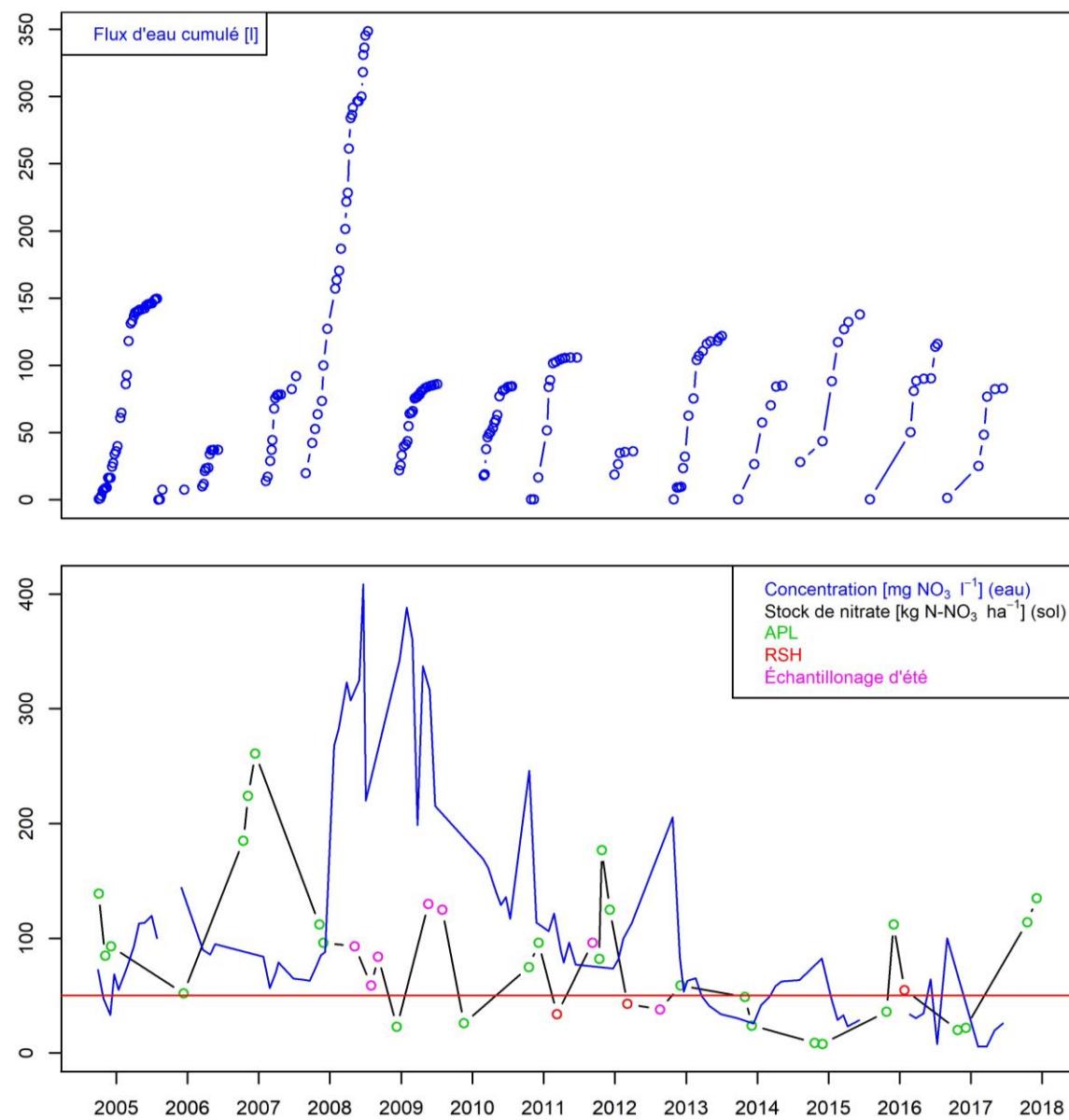


Figure 5. Évolution des concentrations en azote dans le sol, dans les eaux de percolation et des volumes d'eau cumulés récoltés à la sortie du lysimètre « Grosse Pierre Chemin de fer ».

Le tableau 10 présente le calendrier cultural, les apports d'engrais azotés minéraux et organiques, les flux d'eau, les exportations d'azote par lixiviation et la concentration moyenne en nitrate dans l'eau de lixiviation établie à la fin de chaque période de percolation.

La succession culturale fait intervenir des cultures légumières (8 années sur 14) comme des haricots, des fèves, des épinards ou encore des carottes, des cultures de printemps (3 années sur 14) comme des betteraves, des pommes de terre ou du lin et des cultures d'hiver (3 années sur 14) comme du froment. Généralement, deux cultures de légumes sont effectuées la même année.

La fertilisation de cette parcelle se fait principalement par des apports d'engrais azotés minéraux (tableau 10). De 2004 à 2016, $1242 \text{ kg N ha}^{-1}$ (58,9 %) minéral et 867 kg N ha^{-1} (41,1 %) organique ont été apportés sur la parcelle, soit un total de $2109 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Entre 2005 et 2017, 405,4 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹ ont été lixiviés. La proportion de l'azote qui percole jusqu'à deux mètres de profondeur représente 19,2 % de la masse d'azote apportée.

Durant cette période, des fabacées ont été cultivées à quatre reprises. Une fertilisation naturelle par les rhizobiums vivant en symbiose avec les fabacées, qui peut représenter 195 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹, a donc eu lieu (Voisin et al., 2015). Par ailleurs, l'irrigation apporte aussi une quantité d'azote, difficilement quantifiable sur la parcelle car parfois réalisée avec de l'eau de puits et parfois avec des eaux usées (lavage de légumes) d'Hesbaye Frost. Le rapport calculé est donc légèrement surestimé, car il ne tient pas compte de ces apports.

Il n'empêche que la masse d'azote lixivie reste importante. On peut calculer que la concentration moyenne en nitrate percolant à deux mètres est de 121 mg NO₃⁻ l⁻¹. On remarque une nette amélioration de la qualité de l'eau depuis 2014. Avant cette date, la concentration en nitrate était systématiquement supérieure à la limite de portabilité. En 2006, 640 kg N organique ha⁻¹ (compost de déchets verts) ont été apportés sur le lysimètre après la culture céréalière. Aucune CIPAN n'avait été implantée. Cet apport a en grande partie été lixivié durant les cinq années qui ont suivi. La quantité d'azote exporté entre 2006 et 2011 (327,4 kg N-NO₃⁻ ha⁻¹) représente 81,4 % de la masse lixivieée au cours des 14 dernières années.

Entre 2008 et 2010, la masse de nitrate exportée décroît assez rapidement. Une double culture de fabacée a été installée en 2010, celle-ci a aussi conduit à une augmentation de la lixiviation et interfère avec la décroissance de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation.

L'analyse du tableau 10 montre qu'une contamination peut perdurer relativement longtemps dans le profil cultural. Dans le cas présent, l'application de 640 kg N ha⁻¹ en été 2006 sans mise en place d'une CIPAN montre des effets négatifs sur la qualité de l'eau jusqu'en 2011. Une infiltration « efficace » de plus de 700 litres aura été nécessaire pour « nettoyer » la pollution laissée par l'application de matière organique.

Tableau 10. Bilan des flux d'azote sur la parcelle « Grosse Pierre Chemin de fer ».

Année	Culture				N _{min} [uN]	N _{org} [uN]	N _{tot} [uN]	N _{lix} [uN]	NO ₃ ⁻ [mg l ⁻¹]	Flux [l]
	Culture [1]	Culture [2]	IC courte	IC longue						
2004	Épinards	Haricots	-	Moutarde	168	0	168	-	-	-
2005	Chicorées	-	-	-	46	0	46	23,4	69,2	149,7
2006	Froment	-	-	-	211	640	851	6,1	72,2	37,2
2007	Carottes	-	-	Moutarde	20	0	20	13,9	67,2	91,8
2008	Fèves	Choux	-	-	0 ^a	0	0	184,1	233,7	348,8
2009	-	Poireaux	-	-	100	0	100	68,2	350,6	86,2
2010	Pois	Haricots	-	-	0 ^a	0	0	29	152	84,4
2011	Pommes de terre	-	Moutarde	-	120	0	120	26,1	109	105,9
2012	Froment	-	-	Trèfle et Avoine	170	152	322	6,4	78,2	36
2013	Lin	-	-	Moutarde	0	0	0	16,8	60,9	121,8
2014	Carottes	-	-	-	40	0	40	7,8	40,8	85
2015	Fèves	Épinards	-	-	198	0	198	15	48,3	137,8
2016	Froment	-	-	Moutarde	169	75	244	7	26,9	115,9
2017	Pois							1,5	8,2	82,9

^a essai. IC : interculture. uN = kg N ha⁻¹.

6.3. Gros Thier Bovenistier

La figure 6 présente l'évolution de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation du lysimètre (moyenne mensuelle), le suivi de la concentration en nitrate dans le sol (APL, RSH et échantillonnages d'été) ainsi que le flux d'eau cumulé par saison de drainage. La concentration (moyenne mensuelle) en nitrate dans l'eau de percolation fluctue entre 0,3 et 167,9 mg NO₃⁻ l⁻¹. Ces concentrations ont été mesurées respectivement en avril 2013 et en avril 2012. D'une année à l'autre, les volumes d'eau récoltés varient fortement. Durant la saison de drainage 2005-2006, 9,4 l ont été récoltés alors que 255,3 l ont été récoltés durant la saison de drainage 2014-2015. Cette variation est expliquée par :

- les conditions météorologiques (précipitation et évapotranspiration) ; pluviométrie anormalement faible au cours de l'hiver 2005-2006 et abondante au cours de l'hiver 2014-2015.
- La profondeur racinaire des cultures présentes en hiver et en été et
- les volumes d'eau apportés par irrigation.

On observe en 2011, un stock relativement important d'azote nitrique dans le sol. La lixiviation de ce stock entraînera une hausse de la concentration en nitrate dans l'eau récoltée à la base du lysimètre en 2012. L'année suivante, le stock d'azote nitrique dans le sol va fortement diminuer, entraînant une nette amélioration de la qualité de l'eau.

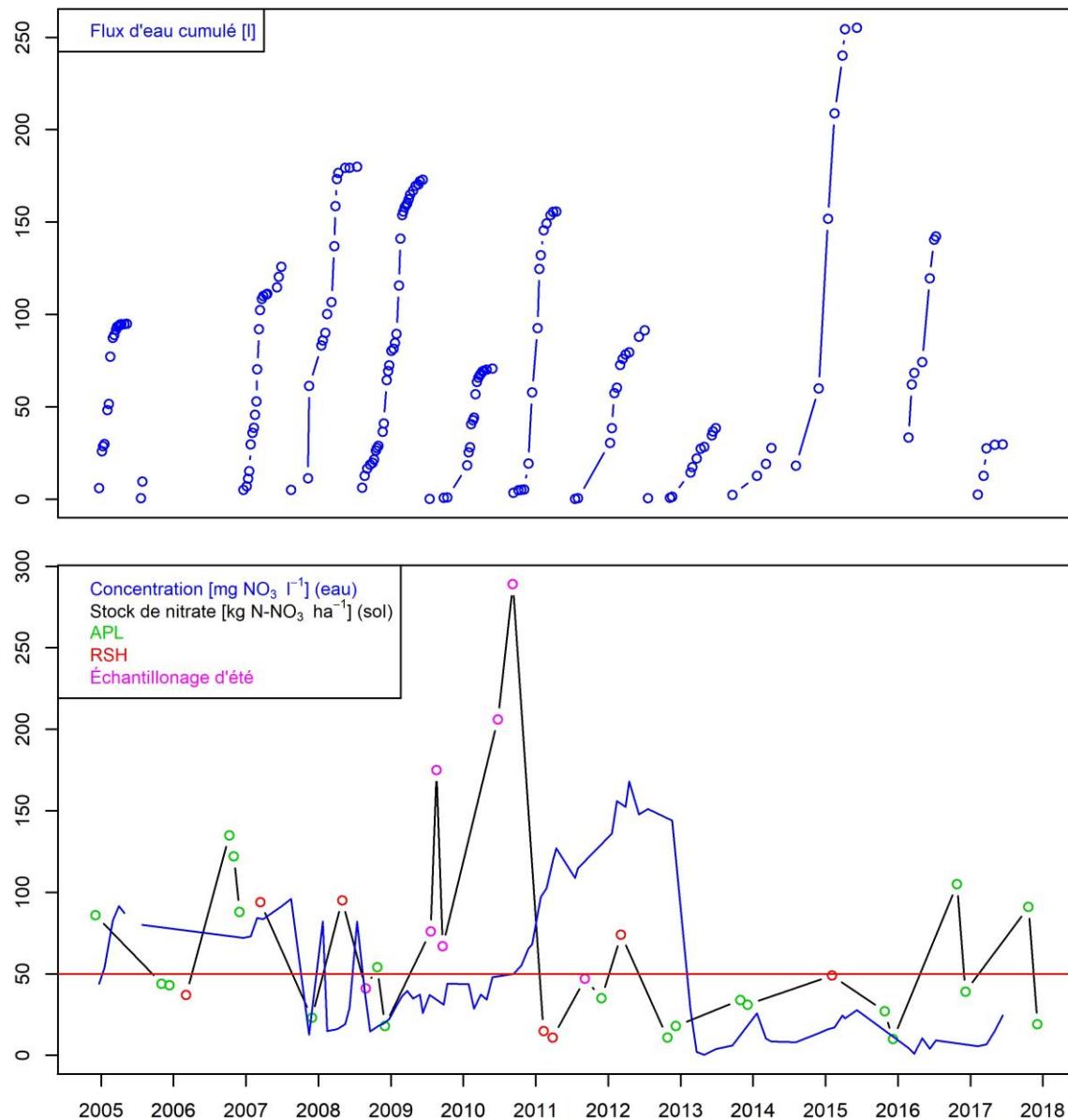


Figure 6. Évolution des concentrations en azote dans le sol, dans les eaux de percolation et des volumes d'eau cumulés récoltés à la sortie du lysimètre « Gros Thier Bovenistier ».

Le tableau 11 présente le calendrier cultural, les apports d'engrais azotés minéraux et organiques, les flux d'eau, les exportations d'azote par lixiviation et la concentration moyenne en nitrate dans l'eau de lixiviation établie à la fin de chaque période de percolation.

La fertilisation de cette parcelle se fait principalement par des apports d'engrais azotés minéraux (tableau 11). De 2004 à 2016, 1296 (83,7 %) kg N minérale ha⁻¹ et 253 (17,3 %) kg N organique ha⁻¹ ont été apportées sur la parcelle, soit un total de 1549 kg N ha⁻¹.

La succession culturale fait intervenir des cultures légumières (7 années sur 14) comme des pois, des fèves, des épinards, des choux, des poireaux ou encore des carottes, des cultures de printemps (5 années sur 14) comme des betteraves, des pommes de terre, du lin ou du maïs et de culture d'hiver (2 années sur 14) comme du froment. Généralement, deux cultures de légumes sont effectuées la même année.

Entre 2005 et 2017, 144 kg N ha^{-1} ont été lixiviés. La proportion de l'azote qui percolé jusqu'à deux mètres de profondeur représente 9,3 % de la masse d'azote apportée.

Durant cette période, des fabacées ont été cultivées à quatre¹⁰ reprises. Une fertilisation naturelle (rhizobium vivant en symbiose avec les Fabacées) a donc eu lieu. Par ailleurs, des matières organiques ont aussi été épandues sans toutefois être prises comme apport d'azote organique. Il s'agit, par exemple, des déchets de poireaux enfuis en 2008 sans être comptabilisés en tant qu'apports d'azote. Par ailleurs, l'irrigation apporte aussi une quantité d'azote (difficilement quantifiable) sur la parcelle. Le rapport calculé est donc surestimé, car il ne tient pas compte de ces apports annexes.

La concentration moyenne en nitrate percolant jusqu'à deux mètres est de 46 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$.

¹⁰ Une l'année 2004. Elle a donc été intégrée dans le décompte.

Tableau 11. Bilan des flux d'azote sur la parcelle « Gros Thier Bovenistier ».

Année	Culture										
	Culture [1]	Culture [2]	IC courte	Hiver	IC longue	N _{min} [uN]	N _{org} [uN]	N _{tot} [uN]	N _{lix} [uN]	NO ₃ ⁻ [mg l ⁻¹]	Flux [l]
2004	Fèves	Choux	-	-	-	170	0	170	-	-	-
2005	Carottes	-	-	-	-	50	0	50	15,7	73,5	94,9
2006	Pommes de terre	-	-	-	-	70	0	70	1,7	80,1	9,4
2007	Betteraves	-	-	Froment	-	91	0	91	23,3	82,1	125,9
2008	Froment	-	-	-	Moutarde	195	0	195	10,7	26,4	180
2009	Fèves	Épinards	-	-	-	100 ^a	0	100	11,9	30,5	172,9
2010	-	-	-	Poireaux	-	0 ^a	0	0	5,9	37,1	70,7
2011	Poireaux	Pois	-	-	Moutarde	0 ^a	0	0	30,7	87,1	155,8
2012	Betteraves	-	-	-	-	90	0	90	30,2	146	91,5
2013	Carotte	-	-	-	-	20	0	20	1,3	15,5	38,4
2014	Pommes de terre	-	-	Froment	-	146	0	146	0,9	15,1	27,6
2015	Froment	-	-	-	Moutarde et Phacélie	180	83	263	9,6	16,7	255,3
2016	Fèves	Épinards	-	-	Moutarde	184	170	354	1,4	4,4	142,3
2017	Lin								0,5	7,3	29,6

^a essai. IC : interculture. uN = kg N ha⁻¹.

6.4. Sole 4

La figure 7 présente l'évolution de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation récolté à la base du lysimètre (moyenne mensuelle), le suivi de la concentration en nitrate dans le sol (APL, RSH et échantillons d'été) ainsi que le flux d'eau cumulé par saison de drainage. La concentration (moyenne mensuelle) en nitrate dans l'eau de percolation fluctue entre 22,9 et 723 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. Ces concentrations ont été mesurées respectivement en janvier 2008 et en juillet 2010. D'une année à l'autre, les volumes d'eau récoltés varient fortement. Durant la saison de drainage 2013-2014, 0,4 l ont été récoltés alors que 202,8 l ont été récoltés durant la saison de drainage 2004-2005. Cette variation est expliquée par les conditions météorologiques (précipitation et évapotranspiration), la profondeur racinaire des cultures présentes en hiver et en été et par les volumes d'eau apportés par irrigation. Ainsi, à titre d'exemple en 2013-2014, le sol était couvert d'une pépinière d'arbres fruitiers et la saison de percolation a suivi un été relativement sec.

Le tableau 12 présente le calendrier cultural, les apports d'engrais azotés minéraux et organiques, les flux d'eau, les exportations d'azote par lixiviation et la concentration moyenne en nitrate dans l'eau de lixiviation établie à la fin de chaque période de percolation.

La fertilisation de cette parcelle se fait principalement par des apports d'engrais azotés minéraux (tableau 12). De 2003 à 2016, 1812 (83,1 %) kg N minéral ha^{-1} et 368 (16,9 %) ont été apportées sur la parcelle, soit un total de 2180 kg N minéral ha^{-1} .

La succession culturale fait intervenir des cultures légumières (4 années sur 14) comme des haricots, des fèves, des épinards ou encore des carottes, des cultures printanières (2 années sur 14) comme des betteraves, des pommes de terre ou du maïs et des cultures hivernales (5 années sur 14) comme du froment. Par ailleurs, une pépinière d'arbres fruitiers a été installée pendant trois années. Durant sa première année, du ray-grass a été semé dans l'interligne de la pépinière pour limiter les flux de nitrate vers la nappe en le fauchant et en l'exportant régulièrement. Durant l'automne, des CIPAN sont généralement installées lorsqu'une culture de froment n'est pas semée.

Entre 2004 et 2017, 437,4 kg N ha^{-1} ont été lixivierés. La proportion de l'azote qui percole jusqu'à deux mètres de profondeur représente 20,1 % de la masse d'azote apportée. Durant cette période, des fabacées ont été cultivées à trois reprises. Une fertilisation naturelle a donc eu lieu grâce à la présence de rhizobium. Le rapport calculé est surestimé, car il ne tient compte ni des apports naturels ni de l'apport par irrigation.

On peut calculer que la concentration moyenne en nitrate percolant jusqu'à deux mètres est de 135,8 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. L'importante concentration moyenne en nitrate à l'exutoire du lysimètre est principalement imputable aux flux de nitrate lors des périodes de lixiviation :

1. 2004- 2005 et 2009-2010 : conséquences de la légumineuse ;
2. 2007-2008 et 2010-2011 : parcelle non couverte au cours de l'automne précédent, après récolte de froment ;
3. 2011 à 2017 (à l'exception de l'année 2014 où seulement 0,4 litre a été récolté) ; sans doute imputable à la pépinière d'arbres fruitiers.

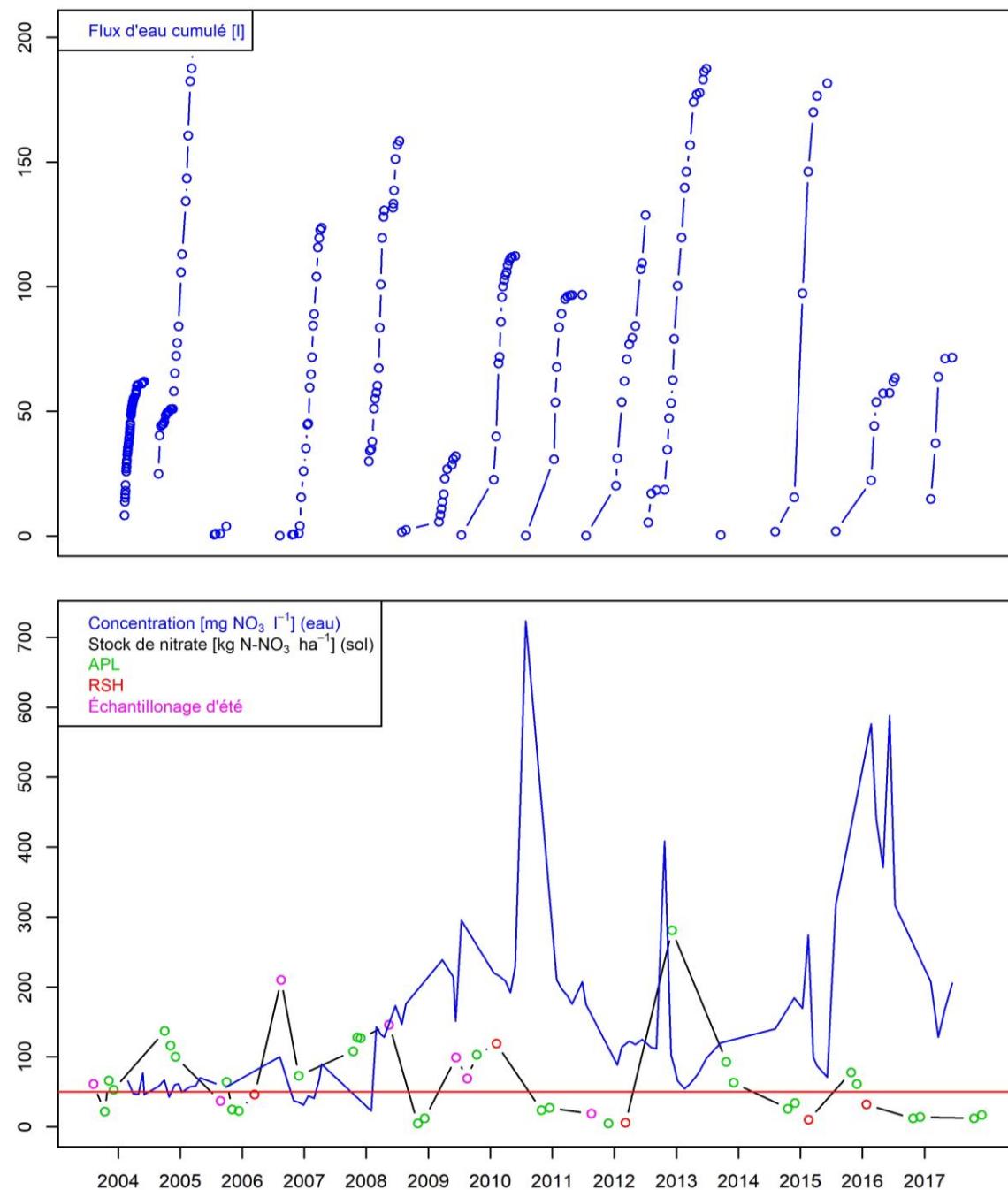


Figure 7. Évolution des concentrations en azote dans le sol, dans les eaux de percolation et des volumes d'eau cumulés récoltés à la sortie du lysimètre « Sole 4 ».

Tableau 12. Bilan des flux d'azote sur la parcelle « Sole 4 ».

Année	Culture										
	Printemps [1]	Printemps [2]	IC	Hiver	IC longue	N _{min} [uN]	N _{org} [uN]	N _{tot} [uN]	N _{lix} [uN]	NO ₃ ⁻ [mg l ⁻¹]	Flux [l]
2003	Froment	-	-		Avoine	188	221	409	-	-	-
2004	Haricot		-	Froment	-	58	0	58	8,1	57,9	62,1
2005	Froment	-	-	-	Phacélie	143	0	143	26,4	57,6	202,8
2006	Fèves	Épinards	-	Froment	-	138	0	138	0,5	56,7	4,1
2007	Froment	-	-	-		163	0	163	13,3	47,6	123,7
2008	Carottes	-	-	-	-	0 ^a	0	0	41	114,5	158,4
2009	Haricots	-	Avoine	Froment	-	0 ^a	0	0	16,2	223,6	32,1
2010	Froment	-	-	-	-	142	0	142	54,1	213,2	112,3
2011	Pépinières + raygrass					184	0	184	45	205,8	96,8
2012	Pépinières					204	0	204	32,7	112,3	128,7
2013	Pépinières					184	0	184	33,9	80,2	187,5
2014	Mais	-	-	-	-	97	0	97	0,1	120	0,4
2015	Pommes de terre	-	-	Froment	-	126	0	126	75,3	183,6	181,6
2016	Froment	-	-	-	Phacélie	185	147	332	66,5	464,5	63,4
2017	Betteraves								24,2	149,6	71,6

^a essai. IC : interculture. uN = kg N ha⁻¹.

6.5. Haute Bova

La figure 8 présente l'évolution de la concentration en nitrate dans l'eau de percolation récoltée à la base du lysimètre (moyenne mensuelle), le suivi de la concentration en nitrate dans le sol (APL et RSH) ainsi que le flux d'eau cumulé par saison de drainage. La concentration (moyenne mensuelle) en nitrate dans l'eau de percolation fluctue entre 9,3 et 241,6 mg $\text{NO}_3^- \text{ l}^{-1}$. Ces concentrations ont été mesurées respectivement en janvier 2011 et en juin 2011. D'une année à l'autre, les volumes d'eau récoltés varient fortement. Durant la saison de drainage 2011-2012, 0,6 l a été récolté alors que 240,9 l ont été récoltés durant la saison de drainage 2015-2016. Cette variation est expliquée par les conditions météorologiques (précipitation et évapotranspiration) et la profondeur racinaire des cultures présentes en hiver et en été.

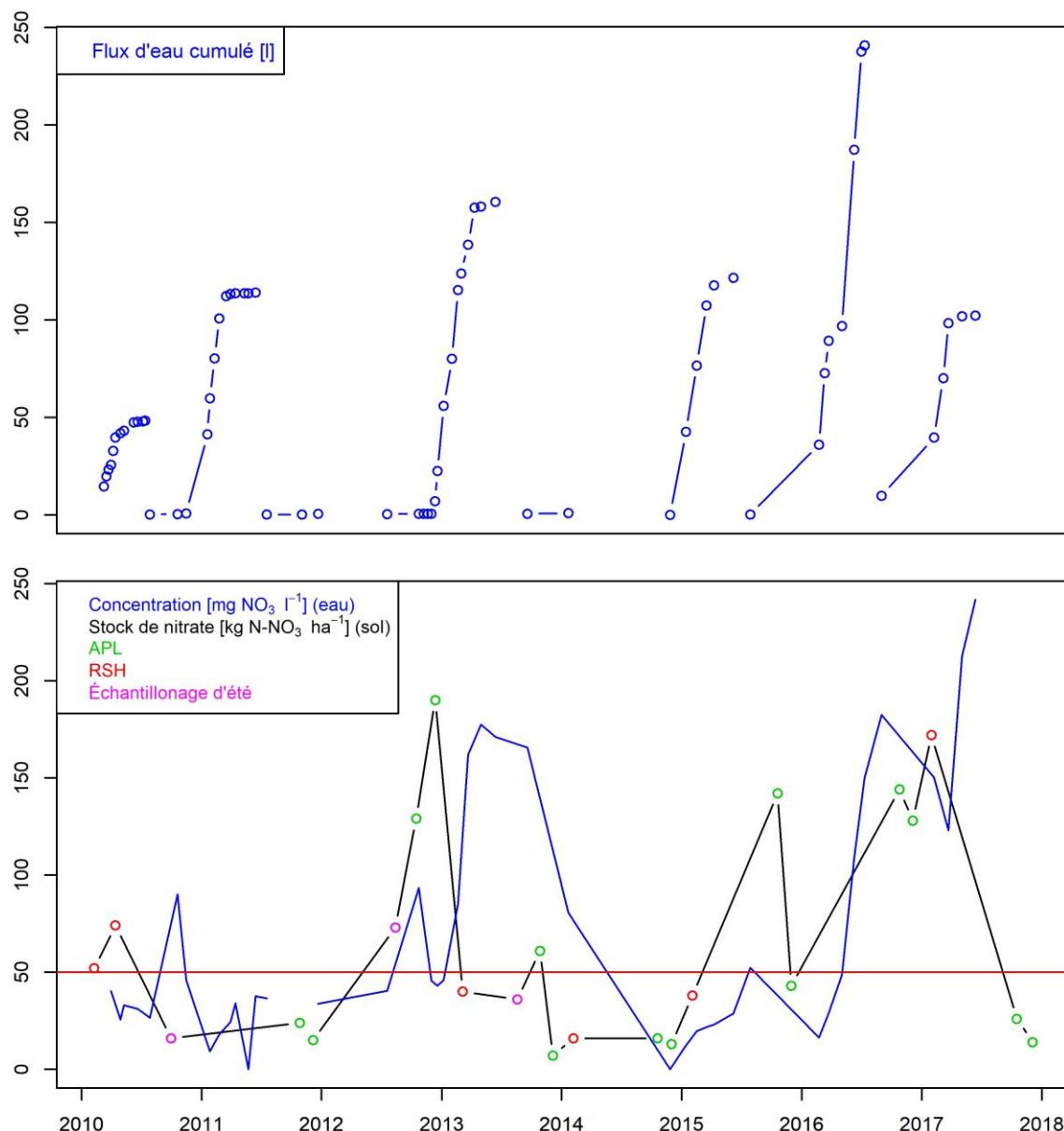


Figure 8. Évolution des concentrations en azote dans le sol, dans les eaux de percolation et des volumes d'eau cumulés récoltés à la sortie du lysimètre « Haute Bova ».

Sur la figure 8, on remarque que la concentration en nitrate dans les eaux de percolation suit les mêmes tendances que la courbe APL. Particulièrement, lors des saisons de drainage 2013-2014-2015-2017. Il

est difficile d'apprécier la tendance avant 2012, car il n'y a pas eu de mesure APL lors de l'hiver 2010 ni d'échantillonnage au printemps 2011.

Le tableau 13 présente le calendrier cultural, les apports d'engrais azotés minéraux et organiques, les flux d'eau, les exportations d'azote par lixiviation et la concentration moyenne en nitrate dans l'eau de lixiviation établie à la fin de chaque période de percolation.

La fertilisation de cette parcelle se fait à la fois par des apports (4 fois au cours des 8 dernières années) de matières organiques (boues, fumier de bovin, compost vert) et des épandages d'engrais azotés minéraux (tableau 13). De 2009 à 2016, 830 (52,2 %) kg N minérale ha^{-1} et 761 (47,8 %) kg N organique ha^{-1} ont été apportés sur la parcelle, soit un total de 1591 kg N ha^{-1} .

La succession culturale fait intervenir des cultures de printemps (4 années sur 8) principalement du pois, de la betterave ou encore pomme de terre ainsi que des cultures d'hiver (4 années sur 8), exclusivement du froment. Avant chaque culture de printemps, une moutarde est implantée durant l'hiver précédent.

Entre 2010 et 2017, 125,6 kg N ha^{-1} ont été lixivierés. La proportion de l'azote importée qui percole jusqu'à deux mètres de profondeur ne représente que 7,9 %. En 2012, une culture de pois a été installée, celle-ci a permis une fertilisation naturelle du sol. Comme le rapport ne tient pas compte de cet apport, il est surestimé. Bien que la proportion d'azote exportée soit faible par rapport aux importations, on peut calculer que la concentration moyenne en nitrate percolant jusqu'à deux mètres est supérieure à la valeur seuil de 50 mg $NO_3^- l^{-1}$ (70,44 mg $NO_3^- l^{-1}$). On constate donc que l'application du PGDA ne permet pas d'atteindre de teneur en nitrate inférieure à la limite de 50 mg $NO_3^- l^{-1}$. L'importante concentration moyenne en nitrate à l'exutoire du lysimètre est principalement imputable aux flux de nitrate lors des périodes de lixiviation 2013 et 2017. En 2013, l'azote exporté a principalement été produit par la fabacée (2014). En 2016 et 2017, il résulte de la lixiviation de la fertilisation apportée sur la culture des plants de pommes de terre.

Tableau 13. Bilan des flux d'azote sur la parcelle « Haute Bova ».

Année	Culture										
	Culture [1]	Culture [2]	IC courte	Hiver	IC longue	N _{min} [uN]	N _{org} [uN]	N _{tot} [uN]	N _{lix} [uN]	NO ₃ ⁻ [mg l ⁻¹]	Flux [l]
2009	Froment	-	-	-	Moutarde	150	294	444	-	-	-
2010	Betteraves	-	-	Froment	-	0	0	65	3,7	34,1	48,4
2011	Froment	-	-	-	Moutarde	165	138	303	3,7	14,5	114,1
2012	Pois	-	Nyger	Froment	-	0	0	0	0	34,7	0,6
2013	Froment	-	-	-	Moutarde	130	159	289	34,4	94,7	160,6
2014	Betteraves	-	-	Froment	-	135	0	135	0,3	136,6	0,9
2015	Froment	-	-	-	Moutarde	190	170	360	5	18,2	121,7
2016	Pommes de terre (plants)	-	-	Froment	-	60	0	60	46,1	84,7	240,9
2017	Froment								32,4	140,1	102,3

uN = kg N ha⁻¹. IC : interculture.

7. Conclusions et perspectives

Depuis 2003, GRENeRA suit la percolation du nitrate à deux mètres de profondeur, en conditions de plein champ dans quatre parcelles limoneuses situées dans la région de Waremme.

L'analyse du nitrate dans les eaux de percolation combinée à l'observation du reliquat azoté dans le sol et au suivi des cultures, intercultures et fertilisation azotée, permet d'évaluer l'impact des pratiques culturales sur la qualité de l'eau.

L'analyse et l'interprétation des résultats de la saison de drainage 2015-2016, faisant l'objet de ce dossier, ont permis de confirmer les tendances observées depuis le début de l'étude (Deneufbourg *et al.*, 2013) ainsi que lors de l'épisode de drainage précédent (Bah *et al.*, 2015). Notamment :

- la bonne qualité de l'indicateur environnemental APL : la teneur moyenne en nitrate dans l'eau de percolation est du même ordre de grandeur que l'APL avec un décalage de 6 à 18 mois en fonction de conditions de la parcelle (culture en place, pluviométrie) ;
- l'implantation d'une pépinière d'arbres fruitiers a eu pour conséquence des APL particulièrement élevés. Le semis d'un ray-grass dans les interlignes des arbres fruitiers permet de maintenir les APL à des niveaux beaucoup plus faibles et par conséquent de limiter la pollution de l'eau de percolation par le nitrate. Par la suite, la destruction du ray-grass dans les interlignes s'est marquée par la détérioration de la qualité de l'eau de percolation ;
- les successions classiques betterave – céréale – CIPAN (correctement gérées au niveau de la fertilisation azotée) permettent d'obtenir des eaux de percolation faiblement chargées en nitrate.

Par ailleurs, les conditions climatiques du printemps 2016 (pluviométrie importante) ont mis en évidence au travers des lysimètres, l'importance de la culture sur les flux d'azote : une culture installée avant l'hiver et bien développée en juin (telle qu'une céréale) a limité les flux consécutifs à cet épisode pluvieux. A l'inverse, une culture installée et fertilisée au printemps (en l'occurrence, de la pomme de terre) n'était sans doute pas suffisamment développée que pour suffisamment consommer cet excès d'eau. Dans ce lysimètre, après cet épisode de pluie, les flux (eau et nitrate) ont été plus importants que ceux observés à la fin de l'hiver.

L'analyse pluriannuelle des flux d'azote à l'échelle de la parcelle montre que :

- des fertilisations organiques mal contrôlées ont des impacts importants sur la dégradation de la qualité de l'eau. ;
- les fertilisations organiques plus « légères » limitent les pertes par lixiviation ;
- les (doubles) cultures de légumes (et les pépinières d'arbres fruitiers) et en particulier les fabacées engendrent d'importants flux d'azote vers les eaux souterraines. Un planning de culture devrait être mis en place afin de pouvoir installer une interculture courte entre deux cultures de légumes, envisager au maximum l'installation de CIPAN durant l'hiver et valoriser au mieux l'agencement des fabacées afin de limiter les fertilisations. Par ailleurs les fertilisations et doses « starter » des cultures de légumes devraient certainement être revues à la baisse.
- les variations temporelles de concentration en nitrate dans l'eau sont relativement importantes. Une variation annuelle de l'ordre de $170 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$ a été rencontrée. Ce pic de pollution a certainement été initié en 2009 et 2010 par deux années consécutives de culture particulièrement polluantes ($\text{APL}_{\text{octobre 2009}} : 265 \text{ kg N ha}^{-1}$, $\text{APL}_{\text{décembre 2009}} : 193 \text{ kg N ha}^{-1}$, $\text{APL}_{\text{octobre 2010}} : 172 \text{ kg N ha}^{-1}$, $\text{APL}_{\text{décembre 2010}} : 210 \text{ kg N ha}^{-1}$). Les pratiques culturales mises en

place les années suivantes ont laissé des reliquats faibles qui ont conduit à des concentrations en nitrate faibles ($< 20 \text{ mg NO}_3^- \text{ l}^{-1}$) et stables jusqu'en 2017.

- on voit qu'une pollution peut perdurer dans le sol, entre 90 cm et 200 cm, relativement longtemps. Ces pollutions peuvent facilement être identifiées par le relevé des APL élevés. Sur ces bases, des cultures à enracinement profond pourraient être cultivées avec des conseils de fertilisations adaptés afin de valoriser au mieux le stock d'azote du sol.

L'analyse des flux (apports et exportations) d'azote (ou de nitrate) sur les quatre lysimètres a montré que le rendement d'utilisation de l'azote est compris entre 73,6 et 92,4 %. Ces rendements quoiqu'elevés ne permettent pas de rencontrer les objectifs du PGDA car les teneurs moyennes en nitrate sont, dans trois cas sur quatre, supérieures à la norme de 50 mg $\text{NO}_3^- \text{/l}$. On peut donc craindre qu'à long terme la qualité de l'eau de la masse d'eau RWM M040 (Crétacé de Hesbaye) continue de se détériorer si les pratiques agricoles ne changent pas.

8. Bibliographie

Bah B., Vandenberghe C., Bachelart F., Colinet G. 2016. *Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en Agriculture*. Dossier GRENeRA **16-04**. 26p. In Vandenberghe C.¹¹, De Toffoli M.¹², Imbrecht O.², Bachelart F.¹, Bah B.¹, Lambert R.², Colinet G.¹, 2015. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2016 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal*. Université catholique de Louvain et Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, 24 p. + annexes.

Cellule Etat de l'Environnement Wallon (2007). Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007. Namur : MRW - DGRNE. 736 pp.

Deneufbourg M., Vandenberghe C., Heens B., Marcoen J.M. (2013) 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 final, juin 2013. Convention Service Public de Wallonie n° 3523/4. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech. 125p. + annexes¹³.

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 1er mars 2003 au 28 février 2005. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Belgique. 106p.

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. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35 (15-18), 913-926.

Muller J-C. (1996). Trente ans de lysimétrie en France (1960-1990). *INRA Editions*. 390 p.

Thornthwaite C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55-94.

Vandenberghe C., Detoffoli M., Bachelart F., Imbrecht O., Colinet G. 2016. *Survey surfaces agricoles. Etablissement des références APL 2016*. Dossier GRENeRA **16-02**. 26p. In Vandenberghe C., De Toffoli M., Bah B., Imbrecht O., Bachelart F., Lambert R., Colinet G., 2016. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2016 des membres scientifiques de Nitrawal*. Université catholique de Louvain et Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, 20p. + annexes.

Vandenberghe C., Marcoen J.M. (2010). Atelier nitrate-eau. Evaluation du Programme de Gestion durable de l'Azote. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14 N° spécial 1, 125.

¹¹ ULg Gembloux Agro-Bio Tech

¹² UCL Earth and Life Institute

¹³ Disponible sur

http://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1_fichiers/Rap_activites/Lysimetre/Rapport_final_2013.pdf.