

**Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote
nitrique et expérimentation en matière de
fertilisation azotée et de successions culturales
en cultures industrielles légumières**

Visa 3523/4

RAPPORT FINAL

Juin 2013

Ce document doit être mentionné comme suit :

Deneufbourg M.¹, Vandenberghe C.¹, Heens B.², Marcoen J.M.¹ (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. + annexes

Le Comité de projet est composé de :

- un représentant du Ministre de la Région wallonne ayant l'agriculture dans ses compétences;
- un représentant de la Direction générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement – direction du développement rural;
- deux représentants de la cellule GRENeRA (ULg – GxABT – Unité Systèmes Sol-Eau) qui assurent le secrétariat du Comité de projet;
- un représentant de l'asbl CPL Végémar;
- un représentant du Service Agronomique de Hesbaye Frost s.a;
- un représentant de l'asbl Nitrawal;
- trois agriculteurs dont les parcelles sont équipées d'un lysimètre ;
- des spécialistes éventuellement désignés par le Ministre.

¹ Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech – Unité Systèmes Sol-Eau – Groupe de Recherche Environnement et Ressources Azotées (GRENeRA)

² Services Agricoles de la province de Liège - Centre Provincial Liégeois des Productions Végétales et Maraîchères ASBL

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	2
1 INTRODUCTION.....	9
1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE	9
2 PROGRAMME DE TRAVAIL ET OBJECTIFS.....	11
3 MATERIEL ET METHODE.....	13
3.1 DESCRIPTION DES SITES RETENUS.....	13
3.2 METHODOLOGIE APPLIQUEE AUX ESSAIS MENES SUR SITES LYSIMETRIQUES	15
3.3 METHODOLOGIE APPLIQUEE AUX ESSAIS HORS SITES LYSIMETRIQUES	17
3.3.1 <i>Essais menés en 2011</i>	18
3.3.2 <i>Essais menés en 2012</i>	20
3.4 METHODOLOGIE POUR LE CALCUL DE LA FUMURE AZOTEE SUR LES ESSAIS.....	21
4 CONTEXTE CLIMATIQUE.....	23
4.1 BILAN CLIMATOLOGIQUE SAISONNIER.....	23
4.2 DEFICIT HYDRIQUE.....	25
5 PROGRAMME D'IRRIGATION.....	27
6 EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS	29
6.1 GROSSE PIERRE CHEMIN DE FER	29
6.1.1 <i>2010 : pois-haricot</i>	29
6.1.2 <i>2011 : pomme de terre</i>	29
6.1.3 <i>2012 : froment</i>	31
6.1.4 <i>2013 : lin</i>	35
6.1.5 <i>Analyse des percolats</i>	36
6.1.6 <i>Synthèse</i>	38
6.2 GROS THIER BOVENISTIER	40
6.2.1 <i>2010 : poireau</i>	40
6.2.2 <i>2011 : haricot</i>	41
6.2.3 <i>2012 : betterave</i>	44
6.2.4 <i>2013 : carotte</i>	45
6.2.5 <i>Analyse des percolats</i>	46
6.2.6 <i>Synthèse</i>	48
6.3 PL1	50
6.3.1 <i>2010 : betterave</i>	50
6.3.2 <i>2011 : froment + CIPAN</i>	52
6.3.3 <i>2012 : carotte</i>	53
6.3.4 <i>2013 : froment</i>	55
6.3.5 <i>Analyse des percolats</i>	56
6.3.6 <i>Synthèse</i>	58
6.4 PL3	60
6.4.1 <i>2010 : fève des marais</i>	60
6.4.2 <i>2010 : épinard d'automne</i>	61
6.4.3 <i>2011 : froment + CIPAN</i>	62
6.4.4 <i>2012 : haricot</i>	64
6.4.5 <i>2013 : froment</i>	66

6.4.6	Analyse des percolats	67
6.4.7	Synthèse	69
6.5	SOLE 4.....	71
6.5.1	2010 : froment	71
6.5.2	2011 : pépinière de pommiers et de poiriers.....	71
6.5.3	2012 : pépinière de pommiers et de poiriers.....	73
6.5.4	2013 : pépinière de pommiers et poiriers	74
6.5.5	Analyse des percolats	75
6.5.6	Synthèse	77
6.6	HAUTE BOVA	79
6.6.1	2010 : betterave.....	79
6.6.2	2011 : froment	80
6.6.3	2012 : pois.....	81
6.6.4	2013 : froment	83
6.6.5	Analyse des percolats	85
6.6.6	Synthèse	87
6.7	PARCELLES NON-EQUIPEES D'UN LYSIMETRE	89
6.7.1	2011 : Forville (carotte).....	89
6.7.2	2011 : Berloz (fève des marais – épinard d'automne).....	90
6.7.3	2011 et 2012: Jeneffe (pois + nyger)	93
6.7.4	2012 : Omal (fève des marais).....	96
6.7.5	2012 : Tourinne (carotte).....	97
7	BILAN FINANCIER.....	99
7.1	BILAN FINANCIER DES ESSAIS EN 2010	99
7.2	BILAN FINANCIER DES ESSAIS EN 2011	101
7.2.1	Impact de la réduction de fertilisation azotée.....	101
7.2.2	Coût de l'implantation de CIPAN	103
7.3	BILAN FINANCIER DES ESSAIS EN 2012	104
7.4	BILAN FINANCIER DE L'ESSAI EN 2013	105
8	CONTRIBUTION DE LA S.A. HESBAYE FROST	107
8.1	ESSAIS DE FERTILISATION EN EPINARD D'HIVER (2010 ET 2011)	107
8.2	SUIVI APL EN CULTURE DE HARICOT (2010).....	107
8.3	SUIVI DE LA MINERALISATION DE L'AZOTE EN EPINARD DE PRINTEMPS (2011)	108
8.4	SUIVI APL EN CULTURE DE HARICOT (2011).....	108
9	VULGARISATION DU RETOUR D'EXPERIENCE	109
9.1	ORGANISATION DE VISITES DE TERRAIN	109
9.2	ORGANISATION D'UNE CONFERENCE DE RESTITUTION DES ENSEIGNEMENTS DE L'ETUDE	110
9.3	DIFFUSION DANS LA PRESSE SPECIALISEE D'UN ARTICLE DE SYNTHESE.....	110
10	CONTAMINATION DE L'EAU PAR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES	111
10.1	INTRODUCTION.....	111
10.2	SUIVI DE LA PERCOLATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES A PARTIR D'ECHANTILLONS COMPOSITES.....	112
10.2.1	Sole 4.....	113
10.2.2	Bovenistier.....	116

10.2.3	Haute Bova.....	118
10.2.4	Chemin de fer.....	118
10.3	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	118
11	CONCLUSIONS.....	120
11.1	CONCLUSIONS DES ESSAIS	120
11.2	CONCLUSION DES BILANS FINANCIERS	122
11.3	CONCLUSIONS DE L'OBSERVATION DE LA QUALITE DE L'EAU.....	122
12	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	124
	REMERCIEMENTS.....	125

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1. Récapitulatif des successions culturales et des essais mis en place sur les parcelles équipées d'un lysimètre	16
Tableau 2. Récapitulatif des successions culturales et des essais mis en place sur les parcelles non-équipées d'un lysimètre.....	17
Tableau 3. Profondeurs racinaires prises en compte pour le calcul du conseil de fumure	22
Tableau 4. Données météo mensuelles à la station de mesure de Geer (juin 2010 – juin 2013).....	24
Tableau 5. Irrigations sur les parcelles suivies en 2010	27
Tableau 6. Irrigations sur les parcelles suivies en 2011	28
Tableau 7. Irrigations sur les parcelles suivies en 2012	28
Tableau 8. APL (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (pois + haricot) –2010	29
Tableau 9. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (pomme de terre) –2011	30
Tableau 10. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (froment) - 2012.....	32
Tableau 11. Rendement et qualité de la récolte sur le parcellaire expérimental de la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (froment) - 2012.....	33
Tableau 12. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (CIPAN après froment) - 2012.....	34
Tableau 13 : Parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate	37
Tableau 14. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (poireaux) - 2010.....	40
Tableau 15. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (poireaux) - 2011	41
Tableau 16. Rendements et poids moyen par poireau obtenus sur l'essai de la parcelle Gros Thier Bovenistier (poireau) - 2010	41
Tableau 17. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (haricot) - 2011.....	42
Tableau 18. Rendements et rapports grain/gousse obtenus sur l'essai de la parcelle Gros Thier Bovenistier (haricot) - 2011	42
Tableau 19. APL (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (haricot) - 2011.....	43
Tableau 20. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (betterave) - 2012	45
Tableau 21. APL (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur la parcelle Gros Thier Bovenistier (betterave) - 2012.....	45
Tableau 22 : Parcelle Gros Thier Bovenistier, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate	47
Tableau 23. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 (betterave) - 2010	50
Tableau 24. Reliquats azotés (kg N-NO ₃ ⁻ /ha) sur la parcelle PL1 (à l'exception de l'essai) (betterave) – 2010	50
Tableau 25. Rendement total et rendement sucre obtenus sur l'essai de la parcelle PL1 (betterave) – 2010	52

Tableau 26. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de PL1 (froment + CIPAN) – 2011	53
Tableau 27. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 (carotte) – 2012.....	54
Tableau 28 : Parcelle PL1, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate	57
Tableau 29. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de PL3 (fève des marais) -2010	60
Tableau 30. Rendements et tendérométrie obtenus sur l’essai de la parcelle PL3 (fève des marais) - 2010	61
Tableau 31. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 (épinard d’automne) - 2010	61
Tableau 32. Rendements et rapports tige-feuille obtenus sur l’essai de la parcelle PL3 (épinard d’automne) - 2010	62
Tableau 33. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de PL3 (froment + CIPAN) - 2011	63
Tableau 34. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 (haricot) - 2012	65
Tableau 35. Parcelle PL3, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate	68
Tableau 36. APL (kg N-NO₃⁻/ha) sur la parcelle Sole 4 (froment) –2010	71
Tableau 37. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) dans la parcelle Sole 4 (pépinière de pommiers et poiriers) - 2011.....	72
Tableau 38. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur dans la parcelle Sole 4 (pépinière de pommiers et poiriers) - 2012.....	74
Tableau 39 : Parcelle sole 4, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate	76
Tableau 40. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Haute Bova (betterave) - 2010	79
Tableau 41. Rendement total et rendement sucre obtenus sur l’essai de la parcelle Haute Bova (betterave) - 2010	80
Tableau 42. APL (kg N-NO₃⁻/ha) sur la parcelle Haute Bova (froment + moutarde) - 2011.....	81
Tableau 43. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur la parcelle Haute Bova (pois) - 2012 ..	81
Tableau 44. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés dans la parcelle Haute Bova – froment en 2013 après pois en 2012.....	83
Tableau 45. Rendement et qualité de la récolte sur le parcellaire expérimental de la parcelle Haute Bova (froment après pois) - 2013	84
Tableau 46. Parcelle Haute Bova, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate	86
Tableau 47. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés dans la parcelle Forville – carotte en 2011.....	89
Tableau 48. Rendements et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Forville – carotte en 2011	90
Tableau 49. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés dans la parcelle Berloz – fève des marais en 2011	91
Tableau 50. Rendements et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Berloz en fève des marais en 2011	91
Tableau 51. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Berloz en épinards d’automne en 2011.....	92

Tableau 52. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Berloz après épinards d'automne en 2011	92
Tableau 53. Rendements et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Berloz en épinard d'automne en 2011	93
Tableau 54. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Jeneffe – pois en 2011	94
Tableau 55. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés dans la parcelle Jeneffe – froment en 2012 après pois en 2011.....	95
Tableau 56. Rendement et qualité de la récolte sur le parcellaire expérimental de la parcelle Jeneffe (froment après pois) - 2012	95
Tableau 57. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés dans la parcelle Omal – fève des marais en 2012	96
Tableau 58. Rendement et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Omal (fève des marais) en 2012.....	96
Tableau 59. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) mesurés dans la parcelle Tourinne – carotte en 2012.....	97
Tableau 60. Rendement et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Tourinne (carotte) en 2012.....	98
Tableau 61. Résultats des essais 2010 en termes de rendement et de bilan financier (€/ha)	100
Tableau 62. Résultats des essais sur sites lysimétriques en 2011 en termes de rendement et de bilan financier (€/ha).....	102
Tableau 63. Résultats des essais hors sites lysimétriques en 2011 en termes de rendement et de bilan financier (€/ha).....	102
Tableau 64. Impact financier estimé de l'implantation des CIPAN sur les essais 2011	104
Tableau 65. Résultats financiers des essais en froment après une interculture courte .	104
Tableau 66. Résultats financiers des essais en légumes hors sites lysimétriques.....	104
Tableau 67. Résultats financiers de l'essai en froment après une interculture courte ..	106
Tableau 67. Liste des parcelles en 'suivi phyto' et précédents culturels associés.....	112
Tableau 68. Indice GUS des matières actives présentes dans les lixiviats (source : Pesticide Properties Database http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/fr/index.htm)	114
Tableau 69. Caractéristiques du clopyralide et du métamitron	117
Tableau 70. Bilan massique du métamitron sur la parcelle Bovenistier.....	117

Figure 1. Carte de localisation des lysimètres Grosse Pierre Chemin de Fer, Gros Thier Bovenistier et Haute Bova	14
Figure 2. Carte de localisation des lysimètres PL1, PL3 et Sole 4	14
Figure 3. Exemple de parcellaire expérimental sur une parcelle équipée d'un lysimètre	17
Figure 4. Exemple de parcellaire expérimental pour un essai de fertilisation sur une parcelle sans lysimètre	19
Figure 5. Exemple de parcellaire expérimental pour un essai CIPAN sur une parcelle sans lysimètre (SN = sol nu ; SC = sol couvert)	19
Figure 6. Parcellaire expérimental pour un essai de fertilisation en fève des marais sur la parcelle 'Omal'	20
Figure 7. Parcellaire expérimental pour un essai de fertilisation en carotte sur la parcelle 'Tourinne'	21

Figure 8. Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de mesure de Geer (juin 2010 – juin 2013)	25
Figure 9. Pluviométrie, évapotranspiration potentielle et déficit hydrique (juin 2010 – juin 2013) à la station de mesure de Geer	26
Figure 10. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Chemin de Fer et APL de référence 2011 en pomme de terre (classe A5).....	31
Figure 11. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Chemin de Fer et APL de référence 2012 en céréale avec CIPAN (classe A2).....	34
Figure 12. Synthèse des mesures et observations, parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer	39
Figure 13. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier et APL de référence 2011 en légumes	44
Figure 14. Synthèse des mesures et observations, parcelle Gros Thier Bovenistier	49
Figure 15. Résultats APL de la parcelle PL1 par rapport à l'APL de référence 2010 (betterave – classe A1).....	51
Figure 16. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 et APL de référence 2011 en céréales avec CIPAN	53
Figure 17. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 et APL de référence 2012 en légumes	55
Figure 18. Synthèse des mesures et observations, parcelle PL1.....	59
Figure 19. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 et APL de référence 2011 en céréales avec CIPAN	64
Figure 20. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 et APL de référence 2012 en légumes (classe A7).....	65
Figure 21. Synthèse des mesures et observations, parcelle PL3.....	70
Figure 22. Synthèse des mesures et observations, parcelle Sole 4.....	78
Figure 23. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Haute Bova et APL de référence 2012 en légumes (classe A7)	82
Figure 24. Synthèse des mesures et observations, parcelle Haute Bova.....	88
Figure 25. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Jeneffe et APL de référence 2011 en légumes.....	94
Figure 26. Classement des sites de contrôle de la qualité des eaux souterraines en fonction des pesticides en Région wallonne.....	111
Figure 27. Diagramme de risque de lixiviation de produits phytosanitaire (indice GUS) (source : Barriuso et al, 1996)	115

1 Introduction

Ce rapport présente les résultats obtenus dans le cadre de l'étude intitulée « **Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique et expérimentation en matière de fertilisation azotée et de successions culturales en cultures industrielles légumières** ». Cette subvention (réf. 3523/4) a été allouée par le Service Public de Wallonie (DGO3) à la cellule GRENeRA (Unité Systèmes Sol-Eau – 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), pour une période de 33 mois (1^{er} octobre 2010 – 30 juin 2013).

Cette subvention poursuit les travaux réalisés dans le cadre de trois précédentes conventions ; celles-ci concernaient :

- pour la période du 1^{er} mars 2003 au 28 février 2005 : la « **Mise en place d'un suivi lysimétrique afin de vérifier la pertinence des normes d'épandage et Azote Potentiellement Lessivable (APL) de référence du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en région wallonne** » (réf. 3523/1) (Fonder et al., 2005) allouée par la Région wallonne à l'ASBL Epuvaleau, en partenariat avec GRENeRA et l'ASBL Centre Maraîcher de Hesbaye;
- pour la période du 1^{er} mars 2005 au 31 mai 2007 : le « **Suivi lysimétrique de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en agriculture** » (réf. 3523/2) (Fonder et al., 2007) allouée par la Région wallonne à l'ASBL Epuvaleau, en partenariat avec GRENeRA et l'ASBL Centre Maraîcher de Hesbaye ;
- pour la période du 1^{er} janvier 2008 au 30 juin 2010 : l' « **Adaptation des pratiques agricoles en fonction des exigences de la Directive Nitrates et la validation des résultats via le suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique** » (réf. 3523/3) (Deneufbourg et al., 2010) allouée par le Service Public de Wallonie à GRENeRA, en partenariat avec l'ASBL Epuvaleau et l'ASBL CPL Végémar.

1.1 Contexte de l'étude

Depuis le milieu des années 1970, la concentration en nitrate dans les eaux souterraines a significativement augmenté en région wallonne (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 diminution des superficies de prairie, augmentation de l'utilisation d'azote minéral et organique), les secteurs « industriel » et « domestique » ayant également un impact sur celle-ci. Compte tenu de l'épaisseur variable du substrat non-saturé surmontant les aquifères wallons ainsi que de l'inertie du système (zones vadose et saturée), 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 en région wallonne 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'observations 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 dans l'un ou l'autre secteur d'activités (agricole, industriel ou domestique).

Le transit du nitrate dans la zone vadose constitue donc la véritable inconnue du système. L'utilisation de lysimètres se révèle être un outil 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).

Dans ce contexte, six lysimètres ont été mis en place en 2003 et sont exploités depuis sur des parcelles agricoles en Hesbaye, région à vocation principalement légumière. Ces lysimètres permettent le suivi 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 et des valeurs des APL³ de référence (Vandenberghe et al., 2012) 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 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.

Depuis 2008, une série d'essais menés à l'aplomb des lysimètres visent à tester l'impact d'une réduction des niveaux de fertilisation d'une part et de l'introduction de CIPAN⁴ dans la rotation d'autre part sur les rendements des cultures, les reliquats azotés du sol et les concentrations 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. 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 culturales complètes, en ce compris la fertilisation raisonnée et les CIPAN adaptées à chaque culture présente dans la rotation.

³ Azote potentiellement lessivable : reliquat azoté mesuré dans le sol à l'automne (en début de période de lixiviation) jusqu'à une profondeur de 90cm

⁴ Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate

2 Programme de travail et objectifs

Au cours de la présente étude, la poursuite des expérimentations à l'aplomb des lysimètres a permis de mesurer l'impact sur la qualité de l'eau de percolation de la mise en œuvre des modifications de pratiques en matière de fertilisation azotée proposées dans les conclusions de la convention précédente (réf. 3523/3). Les mesures individuelles de rendement et de qualité de la récolte ont permis de mesurer l'impact financier des modifications de pratiques proposées.

Le déplacement d'un lysimètre vers un contexte d'apports réguliers de matière organique a permis de mieux appréhender les relations entre fertilisation azotée, APL et qualité de l'eau de percolation dans ce contexte particulier.

Par ailleurs, selon les conclusions de la convention précédente (3523/3), il était pertinent de poursuivre l'expérimentation en culture de fève des marais et de carotte pour évaluer jusqu'où les conseils de fumure pouvaient être réduits sans avoir d'incidence négative sur le rendement et/ou la qualité de la récolte. Ces expérimentations ont été mises en place en dehors des sites lysimétriques sur des parcelles où les conseils de fumure sont les plus élevés ; c'est-à-dire avec les reliquats azotés en sortie d'hiver les plus faibles. Ces mêmes conclusions relevaient également le problème de la gestion de l'interculture après un pois (ou un haricot ou une fève des marais), surtout si l'implantation d'une céréale d'hiver est prévue à l'automne. L'expérimentation de CIPAN entre un pois et une céréale d'hiver ainsi que la mesure de l'impact de cette CIPAN sur la céréale d'hiver était également intéressante. Une expérimentation a donc été menée sur ces trois sujets en dehors des parcelles lysimétriques.

Concrètement, le projet était articulé autour de 3 axes.

1. Axe « expérimentation » : l'objectif de l'axe « expérimentation » était de tester l'impact d'une réduction de la fertilisation sur les rendements, les APL et la qualité de l'eau de percolation dans les parcelles équipées d'un lysimètre. L'expérimentation a porté sur deux niveaux de fumure : un niveau de fumure qualifié de 'fumure conseil' et un niveau de fumure qualifié de 'fumure conseil réduite' (cf. §3.2). Quatre répétitions par niveau de fertilisation ont été mises en place. Les sous-parcelles ont été récoltées séparément en vue de la quantification individuelle de leur rendement. Un suivi APL a permis de rendre compte chaque année du risque de lixiviation de l'azote lié à chacun des scénarios testés sur les différentes parcelles.

Par ailleurs, comme dit plus haut, des expérimentations ont été menées hors sites lysimétriques sur la fertilisation azotée en culture de fève des marais, de carotte et sur la gestion de l'interculture après pois.

2. Axe « analyse technico-économique » : l'objectif de cet axe était de chiffrer l'impact économique des modifications apportées aux pratiques culturales de l'agriculteur. Ceci a permis, sur tous les sites d'essais, de mettre en balance les bénéfices environnementaux des scénarios testés avec l'impact économique de ces scénarios. L'axe « analyse technico-économique » a impliqué la récolte séparée des différentes sous-parcelles, en vue de la quantification individuelle de leur rendement.
3. Axe « vulgarisation » : l'objectif principal de cet axe était la sensibilisation des producteurs de légumes wallons, et surtout du milieu de l'industrie légumière, aux enjeux de la problématique nitrate.

Un objectif sous-jacent était la poursuite et le renforcement de l'information de l'existence en Wallonie d'une plate-forme d'essais permettant l'utilisation d'outils lysimétriques et la diffusion des résultats et enseignements des expérimentations menées sur la fertilisation et les itinéraires culturaux en cultures légumières.

3 Matériel et méthode

3.1 Description des sites retenus

Les sites d'étude sont dénommés selon les noms des parcelles utilisés par les agriculteurs et le CPL Végémar, soit Grosse Pierre Chemin de Fer, Gros Thier Bovenistier, PL1, PL3, Sole 4 et Haute Bova (Figure 1 et Figure 2).

Les lysimètres sont installés en Hesbaye (Wallonie), au sein de trois fermes faisant partie du « Survey Surfaces Agricoles », réseau de 36 exploitations situées sur le territoire wallon et dans lesquelles près de 250 parcelles sont suivies en matière de gestion de l'azote, dans le but d'établir annuellement les valeurs d'APL de référence (Vandenberghe et al., 2012). Ces parcelles sont également suivies par le CPL Végémar qui contribue notamment à la gestion du périmètre irrigué utilisant les eaux usées de l'usine de surgélation et de conditionnement de légumes Hesbaye Frost s.a. Cinq lysimètres sont 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) avec apport régulier de matière organique.

Les sols caractéristiques de la région sont des limons profonds. 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).

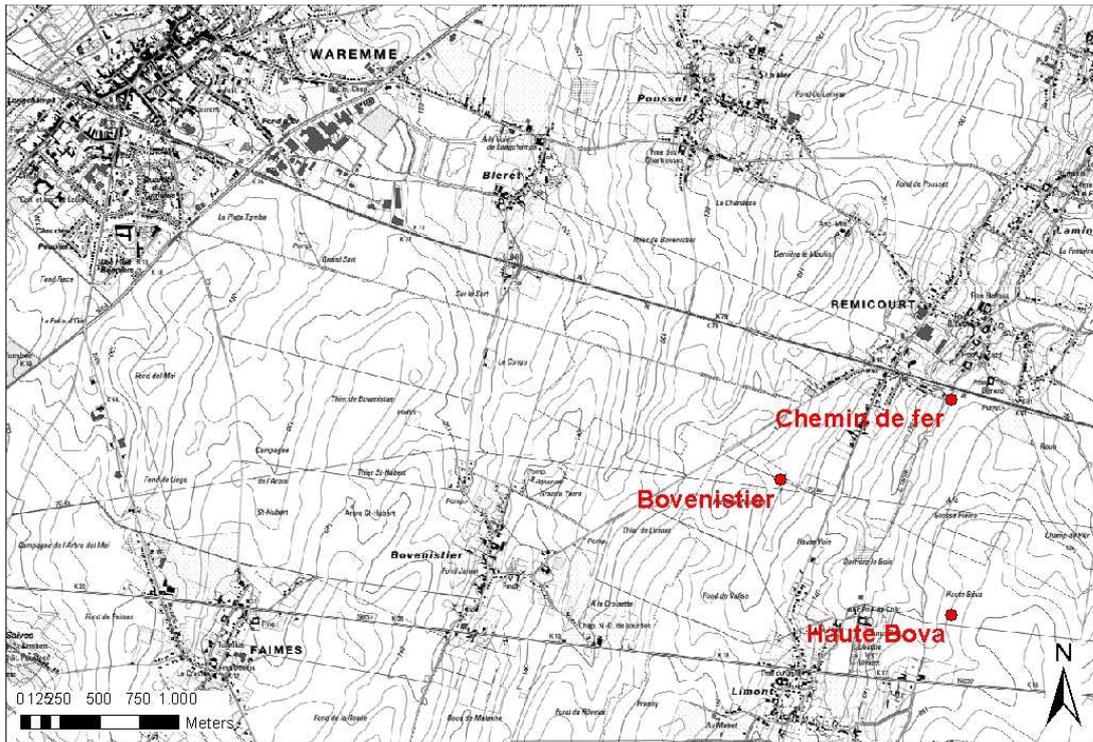


Figure 1. Carte de localisation des lysimètres Grosse Pierre Chemin de Fer, Gros Thier Bovenistier et Haute Bova

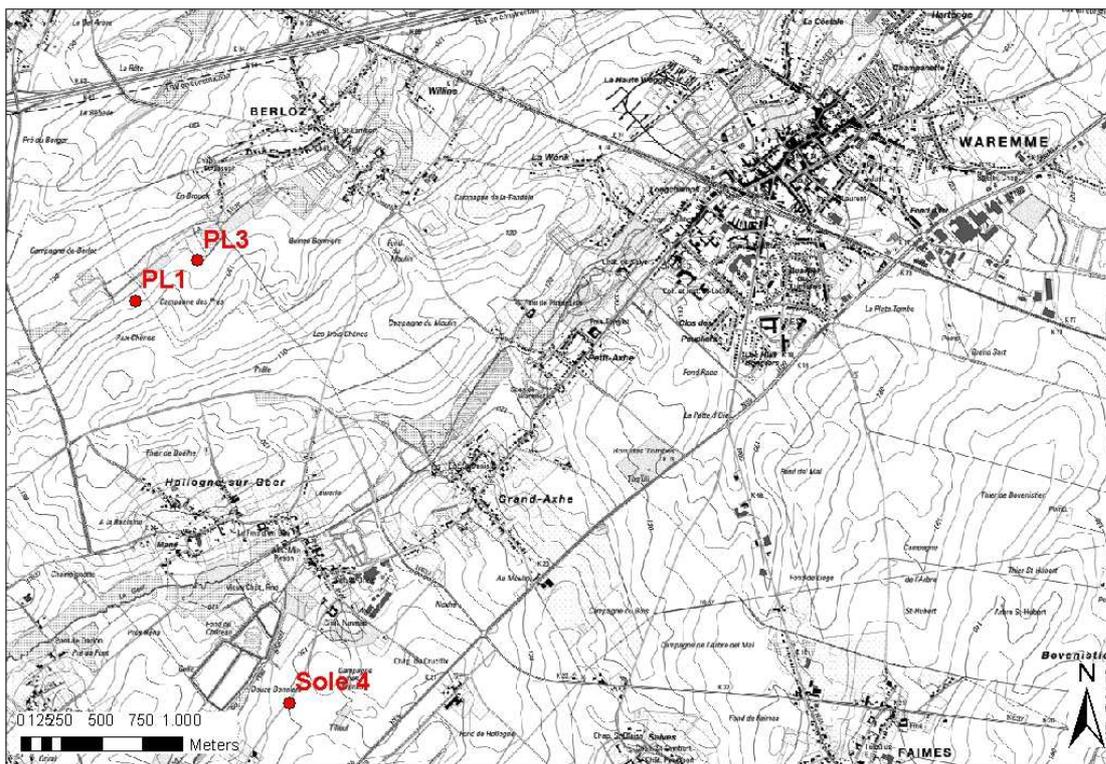


Figure 2. Carte de localisation des lysimètres PL1, PL3 et Sole 4

3.2 Méthodologie appliquée aux essais menés sur sites lysimétriques

Les essais mis en place depuis le début de l'étude sur les parcelles équipées d'un lysimètre sont détaillés au Tableau 1.

L'expérimentation en matière de fertilisation azotée porte sur deux niveaux: un niveau de fumure qualifié de 'fumure conseil' établi sur base d'une mesure du reliquat azoté au semis et un niveau de fumure qualifié de 'fumure conseil réduite' basé sur une réduction du conseil de fumure pouvant aller jusqu'au niveau "zéro azote". Quatre répétitions par niveau de fertilisation sont mises en place. Chaque micro-parcelle reçoit le même niveau de fumure ('conseil' ou 'conseil' réduite) chaque année afin de quantifier l'impact d'une réduction de fertilisation à long terme. La sous-parcelle située à l'aplomb du lysimètre reçoit systématiquement le niveau de fumure réduit.

L'expérimentation en matière de successions culturales porte sur la différenciation des itinéraires au cours de l'interculture. Ceci peut se traduire par exemple par la présence ou l'absence de CIPAN après la culture principale ou encore par des essais de légumineuses en mélange. L'itinéraire jugé potentiellement le plus favorable à l'objectif de réduction de la teneur en nitrate de l'eau de percolation est testé sur la sous-parcelle située à l'aplomb du lysimètre. Les CIPAN testées sont choisies en fonction des dates d'implantation et en concertation avec M. De Toffoli⁵ compte tenu des conclusions des essais CIPAN qui ont été menés par le passé.

Le parcellaire expérimental est constitué de micro-parcelles de 30 à 40 m² selon les situations (Figure 3). Le reliquat azoté est mesuré dans chacune des sous-parcelles par la prise d'un échantillon composite composé de huit carottes de sol jusqu'à 90 cm de profondeur, en trois couches de 30 cm.

L'apport d'azote sur le parcellaire expérimental est réalisé par le CPL Végémar ; l'apport d'azote sur l'ensemble de la parcelle, à l'exception du parcellaire expérimental, est réalisé par l'agriculteur sur base des conseils de fumure du laboratoire provincial ou du CPL Végémar.

⁵ UCL – Earth and Life Institute

Tableau 1. Récapitulatif des successions culturales et des essais mis en place sur les parcelles équipées d'un lysimètre

	2010	2011	2012	2013
Parcelles équipées d'un lysimètre				
Grosse Pierre Chemin de Fer	Pois - haricot	Pomme de terre	Froment + CIPAN	Lin
	Pas d'essai	Essai interculture : – moutarde – sol nu	▪ Suivi de l'impact de l'essai 2011 sur le rendement et les reliquats azotés ▪ Essai interculture : – avoine + trèfle d'Alex. – trèfle d'Alexandrie	Pas d'essai
Gros Thier Bovenistier	Poireau	Haricot	Betterave	Carotte
	Essai réduction ferti : -50UN	▪ Essai réduction ferti : -37UN ▪ Essai interculture : – moutarde – sol nu	Pas d'essai	Pas d'essai
PL1	Betterave	Froment + CIPAN	Carotte	Froment
	Essai réduction ferti : -61UN	Essai interculture : – avoine + trèfle d'Alex. – trèfle d'Alexandrie	Suivi de l'impact de l'essai 2011 sur les reliquats azotés	Pas d'essai
PL3	Fève des marais - épinard	Froment + CIPAN	Haricot	Froment
	Essai réduction ferti : -26 UN sur fève des marais et - 40 UN sur épinard	Essai interculture : – avoine – vesce + avoine	Suivi de l'impact de l'essai 2011 sur les reliquats azotés	Pas d'essai
Sole 4	Froment	Pépinière de fruitiers	Pépinière de fruitiers	Pépinière de fruitiers
	Pas d'essai	Semis d'un ray-grass sur le parcellaire	Pas d'essai	Pas d'essai
Haute Bova	Betterave	Froment + CIPAN	Pois	Froment
	Essai réduction ferti : -78UN	Pas d'essai	Essai interculture : – moutarde – nyger	Suivi de l'impact de l'essai 2012 sur les reliquats azotés

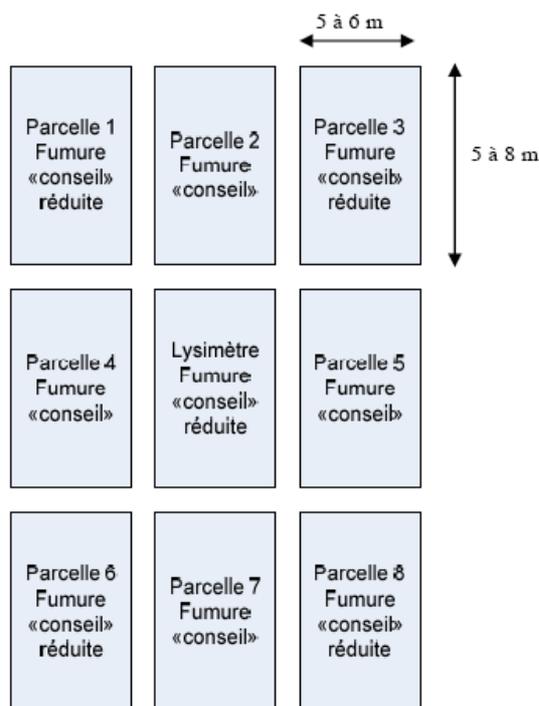


Figure 3. Exemple de parcellaire expérimental sur une parcelle équipée d'un lysimètre

3.3 Méthodologie appliquée aux essais hors sites lysimétriques

Pour répondre aux objectifs de la convention (cf. §2), trois essais ont été mis en place dans des parcelles qui ne sont pas équipées de lysimètre en 2011 et deux essais ont été mis en place dans deux autres parcelles en 2012 (Tableau 2).

Tableau 2. Récapitulatif des successions culturales et des essais mis en place sur les parcelles non-équipées d'un lysimètre

	2010	2011	2012	2013
Parcelles non-équipées d'un lysimètre				
Forville	/	Carotte Essai réduction ferti : -40UN et -80UN	/	/
Berloz	/	Fève des marais - épinard Essai réduction ferti en fève des marais : -50UN et -100UN	/	/
Jeneffe	/	Pois Essai interculture : - nyger - sol nu	Froment Suivi de l'impact de l'essai 2011 sur le rendement et les reliquats azotés	/
Omal	/	/	Fève des marais Essai réduction ferti : -49UN	/
Tourinne	/	/	Carotte ▪ Essai réduction ferti : -45UN ▪ Essai date d'apport de l'engrais azoté	/

3.3.1 Essais menés en 2011

Deux essais menés en 2011 concernaient une réduction de la fertilisation azotée en carotte (parcelle située dans la commune de Forville, dénommée ci-après 'Forville') et en fève des marais (parcelle située dans la commune de Berloz, dénommée ci-après 'Berloz'). Les deux parcelles où ont été implantés ces essais ont été choisies pour leurs faibles reliquats azotés de sortie d'hiver (conseils de fertilisation élevés) afin de pouvoir tester une réduction conséquente du conseil. Trois niveaux de fertilisation ont été testés sur ces essais :

- un niveau de fumure qualifié de 'fumure ancien conseil' qui est calculé selon les anciennes valeurs de besoins forfaitaires, à savoir 120kg N/ha pour la fève des marais et 150kg N/ha pour la carotte;
- un niveau de fumure qualifié de 'fumure nouveau conseil' qui est calculé selon les nouvelles valeurs de besoins forfaitaires, à savoir 70kg N/ha pour la fève des marais et 110kg N/ha pour la carotte. Ces nouvelles valeurs de besoins forfaitaires sont le résultat des recommandations de la convention précédente;
- un niveau 'zéro azote'.

Ces trois niveaux de fumure doivent permettre de valider les nouvelles valeurs de besoins forfaitaires utilisées pour établir les conseils de fumure et de tester s'il est encore possible de réduire ces valeurs.

Le parcellaire expérimental était organisé en blocs aléatoires complets (Figure 4). Il était constitué de douze micro-parcelles de 22 m² (quatre répétitions par niveau de fumure qui correspondent aux quatre blocs et trois niveaux de fertilisation qui correspondent aux trois facteurs). Chaque sous-parcelle a été récoltée séparément en vue d'y quantifier les rendements et les reliquats azotés post-récolte.

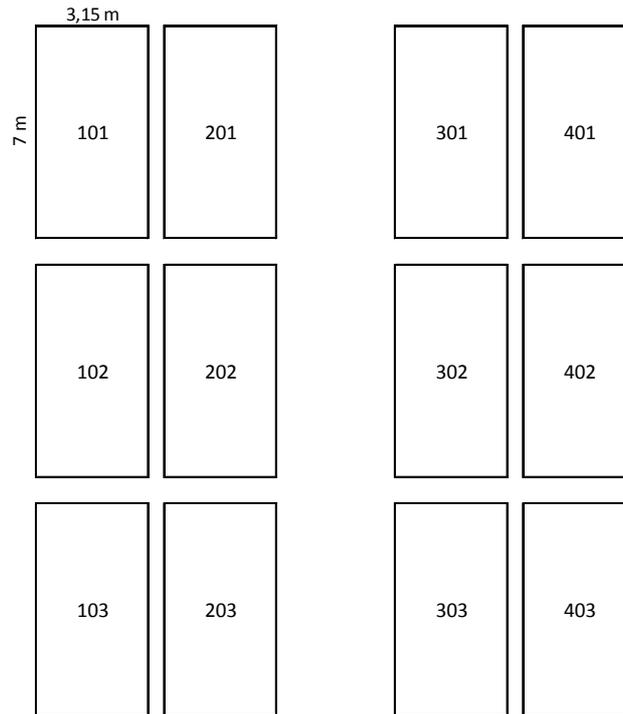


Figure 4. Exemple de parcellaire expérimental pour un essai de fertilisation sur une parcelle sans lysimètre

Le troisième essai mené en 2011 hors sites lysimétriques concernait l'implantation d'une CIPAN entre un pois et un froment (parcelle située dans la commune de Jeneffe, dénommée ci-après 'Jeneffe'). Un nyger a été semé sur une partie du parcellaire expérimental après la récolte du pois sur cette parcelle. Le parcellaire expérimental était constitué de huit sous-parcelles de 60 m² (Figure 5) organisées en blocs aléatoires complets (quatre répétitions et deux modalités de couverture du sol : sol couvert ou sol nu).

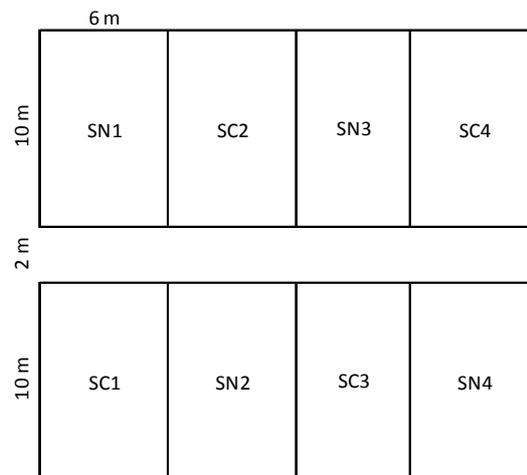


Figure 5. Exemple de parcellaire expérimental pour un essai CIPAN sur une parcelle sans lysimètre (SN = sol nu ; SC = sol couvert)

3.3.2 Essais menés en 2012

Les deux essais menés en 2012 concernaient une réduction de la fertilisation azotée en fève des marais et en carotte. Comme en 2011, les deux parcelles où ont été implantés ces essais ont été choisies pour leurs faibles reliquats azotés de sortie d'hiver (conseils de fertilisation élevés) afin de pouvoir tester une réduction conséquente du conseil.

Sur l'essai en fève des marais (parcelle située dans la commune d'Omal, dénommée ci-après 'Omal'), deux niveaux de fumure ont été testés :

- un niveau de fumure qualifié de 'fumure conseil' qui est calculé selon la valeur de besoin forfaitaire utilisée pour établir les conseils en fève des marais, à savoir 70kg N/ha. Cette valeur est le résultat des recommandations de la convention précédente;
- un niveau 'zéro azote'.

Ces deux niveaux de fumure doivent permettre de voir s'il est encore possible de réduire cette valeur de besoins forfaitaires. Le parcellaire expérimental était organisé en blocs aléatoires complets (Figure 6). Il était constitué de huit micro-parcelles de 22 m² (quatre répétitions par niveau de fumure). Chaque sous-parcelle a été récoltée séparément en vue d'y quantifier les rendements et les reliquats azotés post-récolte.

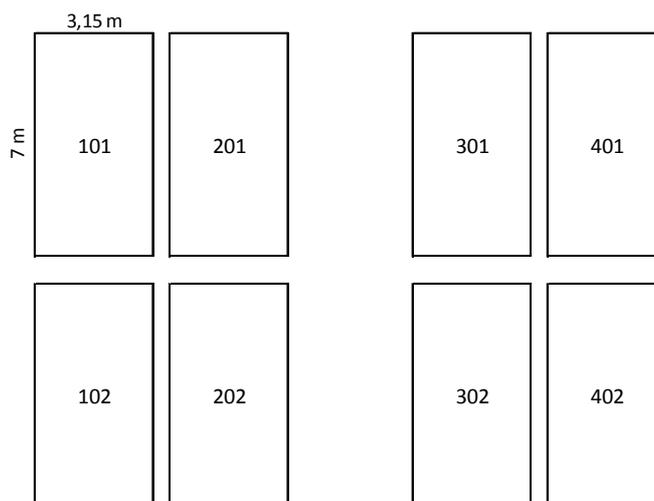


Figure 6. Parcellaire expérimental pour un essai de fertilisation en fève des marais sur la parcelle 'Omal'

Sur l'essai en carotte (parcelle située dans la commune de Tourinne, dénommée ci-après 'Tourinne'), quatre objets correspondant soit au niveau de fertilisation, soit à la date d'apport de l'engrais azoté ont été testés :

- un niveau de fumure qualifié de « fumure conseil » calculé sur base du reliquat azoté présent dans le sol au semis et apporté à ce moment;
- un niveau de fumure calculé sur base du reliquat azoté présent dans le sol au semis mais dont l'apport a été retardé au mois de juillet;
- un niveau de fumure calculé sur base du reliquat azoté présent dans le sol en juillet et apporté à ce moment;
- un niveau 'zéro azote'.

Ces objets doivent permettre d'une part de voir s'il est possible d'encore réduire la valeur de besoin forfaitaire de 110 kg N/ha utilisée en carotte et issue des recommandations de la convention précédente et d'autre part de tester s'il est possible de retarder l'apport d'azote en cours de culture.

Le parcellaire expérimental était organisé en blocs aléatoires complets (Figure 7). Il était constitué de seize micro-parcelles de 22 m² (quatre répétitions par objet). Chaque sous-parcelle a été récoltée séparément en vue d'y quantifier les rendements et les reliquats azotés post-récolte.

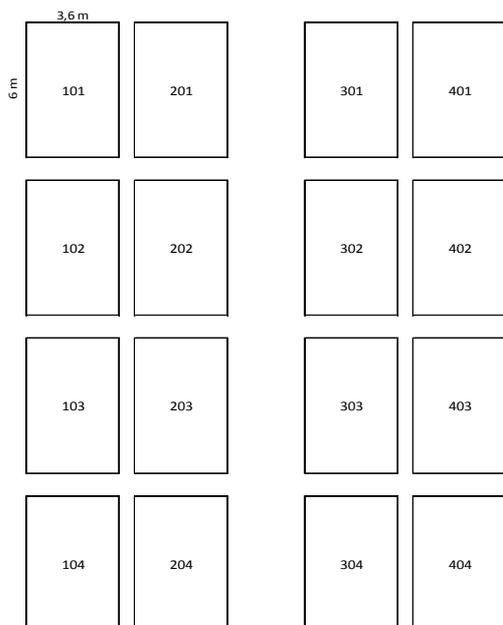


Figure 7. Parcellaire expérimental pour un essai de fertilisation en carotte sur la parcelle 'Tourinne'

Enfin, une parcelle (dénommée 'Jeneffe') a fait l'objet en 2011 d'un essai portant sur l'implantation d'un nyger en interculture courte après récolte de pois (cf. §3.3.1) ; l'impact du nyger sur le reliquat azoté dans le sol et sur le rendement du froment a été mesuré en 2012 sur cette parcelle.

3.4 Méthodologie pour le calcul de la fumure azotée sur les essais

Le calcul de la fumure azotée est basé sur la différence entre les besoins de la culture et les fournitures du sol.

Conseil = Besoins – Fournitures

Besoins: les besoins sont établis sur base des exportations par la culture mais également sur base des analyses de plante complète (partie exportée et partie restant au champ). Les besoins d'une culture peuvent également varier en fonction des objectifs poursuivis (rendement, qualité, nombre de coupe, stade de la récolte). Signalons que, suite aux recommandations de la convention précédente, les besoins forfaitaires ont été réduits pour la fève des marais (de 120 kg N/ha à 70 kg N/ha) et la carotte (de 150 kg N/ha à 110 kg N/ha). Ces valeurs sont

intégrées dans les tableaux de référence de Requasud utilisés pour les conseils de fertilisation (version du 2/5/2011).

Fournitures: les fournitures sont liées essentiellement à la minéralisation de l'humus et de la matière organique composée des apports et des résidus de culture. Pour le calcul de la fumure, le bilan englobe également les reliquats azotés disponibles pour la culture c'est-à-dire la différence entre les reliquats mesurés avant culture sur la profondeur racinaire et les reliquats théoriques résiduels après récolte (souvent estimés à 10 kg d'azote par ha sur un horizon de 30 cm).

Les valeurs des éléments du bilan sont reprises dans le classeur Eau-Nitrate publié par Nitrawal (Nitrawal, 2007).

Pour les cultures légumières, la période de calcul du bilan est parfois très courte. C'est pourquoi, la minéralisation de la matière organique est intégrée à la minéralisation de l'humus pour la prise en compte de la minéralisation globale entre l'ouverture et la fermeture du bilan. La minéralisation totale annuelle intègre donc la minéralisation annuelle de l'humus et de la matière organique. Cette minéralisation annuelle de la matière organique prend en compte les apports organiques de l'interculture, la fréquence de ces apports, le précédent cultural et la culture intermédiaire. La minéralisation disponible reprise sur les bulletins est la part de la minéralisation totale annuelle calculée sur la période qui s'étend de la date de prélèvement du sol jusqu'à la date prévisionnelle de récolte.

Cette méthode de calcul de fumure utilisée pour les cultures légumières a également été utilisée pour le calcul de fumure de la betterave sucrière sur la partie expérimentale de cette convention.

Les bulletins ne reprennent pas la profondeur racinaire de la culture pour la prise en compte des reliquats azotés. Ces profondeurs racinaires par culture sont reprises dans le Tableau 3.

Tableau 3. Profondeurs racinaires prises en compte pour le calcul du conseil de fumure

Culture	Profondeur racinaire
Betterave	90 cm
Carotte	60 cm
Chou frisé	60 cm
Epinard	40 cm
Fève des marais	60 cm
Haricot	40 cm
Poireau	60 cm

4 Contexte climatique

Les données météorologiques (température minimale, température maximale, température moyenne et précipitations) mesurées à la station météo située sur le site de la s.a. Hesbaye Frost à Geer de juin 2010 à juin 2013 sont reprises dans le Tableau 4. Le diagramme ombrothermique construit à partir de ces valeurs est présenté dans la Figure 8.

4.1 Bilan climatologique saisonnier

Le début de l'été 2010 a été particulièrement chaud, ensoleillé et sec, avec même une vague de chaleur au cours de la première moitié de juillet. Le mois d'août a connu un excès très exceptionnel⁶ des précipitations, principalement sous forme orageuse.

L'automne 2010 a été marqué par un excès très anormal des précipitations, principalement au mois de novembre. La température moyenne fût considérée comme normale.

Au cours de l'hiver 2010 – 2011, le mois de décembre fut très anormalement froid et marqué par des précipitations principalement sous forme neigeuse.

Le printemps 2011 a été très exceptionnellement chaud et sec. Le mois d'avril est principalement responsable de l'excès de chaleur, avec une température moyenne très exceptionnellement élevée. Les mois de mars et de mai ont connu des déficits de pluviométrie qualifiés respectivement d'exceptionnel et très anormal.

L'été 2011 a été caractérisé par un excès très anormal de la pluviométrie. Le mois de juillet a été marqué par une température moyenne exceptionnellement basse tandis que le mois d'août a été très anormalement pluvieux.

L'automne 2011 a été exceptionnellement chaud et anormalement sec. L'excès de température était qualifié d'anormal en septembre et novembre tandis que le déficit de pluviométrie était qualifié de très exceptionnel en novembre.

L'hiver 2011 – 2012 a été caractérisé par des valeurs normales de température moyenne mensuelle et de pluviométrie. Le mois de février a été très anormalement froid.

Le printemps 2012 a été caractérisé par des valeurs normales de température moyenne mensuelle et de pluviométrie. Si le mois de mars a été très anormalement chaud, le mois d'avril a connu un déficit très anormal de température.

L'été 2012 a été caractérisé par des valeurs de température moyenne mensuelle et de pluviométrie qualifiées de normales. Les mois de juin et juillet ont été particulièrement pluvieux (valeurs considérées comme exceptionnelles et anormales respectivement), tandis que le mois d'août a été très anormalement sec.

⁶ Un phénomène anormal est égalé ou dépassé en moyenne une fois tous les 6 ans
 -----très anormal-----10 ans
 -----exceptionnel -----30 ans
 -----très exceptionnel-----100 ans

L'automne 2012 a été caractérisé par des valeurs normales de température moyenne et de pluviométrie. Le mois d'octobre a connu un excès très anormal de la pluviométrie, tandis que le mois de novembre a été anormalement sec.

L'hiver 2012 – 2013 a été marqué par un déficit qualifié de normal des températures et un excès anormal des précipitations. Le mois de décembre a été particulièrement pluvieux, avec un excès très exceptionnel des précipitations.

Le printemps 2013 a connu un déficit très exceptionnel de la température moyenne, principalement aux mois de mars et mai, et un excès normal de la pluviométrie. Le mois de mai a été marqué par un excès très exceptionnel des précipitations.

En résumé, l'année climatique 2011 a été marquée par une sécheresse printanière avec une remontée précoce (dès le mois d'avril) des températures, un mois d'août humide et un automne doux et sec. Ces conditions ont favorisé une minéralisation importante en début d'automne (septembre – octobre). L'année climatique 2012 a été marquée par une remontée précoce (dès le mois de mars) des températures après un mois de février particulièrement froid, et une alternance de mois humides (juin, juillet, octobre, décembre) et secs (mars, août, novembre), définissant au final une année 2012 humide. Enfin, le début de l'année 2013 a été plutôt frais, avec un mois de mai très humide.

Tableau 4. Données météo mensuelles à la station de mesure de Geer (juin 2010 – juin 2013)

Mois	t° min (°C)	t° max (°C)	t° moyenne mensuelle (°C)	P (mm)
juin-10	4.8	29.6	16.7	22
juil-10	8	35.4	20.5	46
août-10	8.2	28.1	16.8	155
sept-10	3.5	24.5	13.6	48
oct-10	-1.7	23.1	10.0	43
nov-10	-4.7	16	5.6	86
déc-10	-12.8	5.6	-1.9	24
janv-11	-5.4	12.4	3.2	58
févr-11	-5.5	13.9	4.6	23
mars-11	-4.3	17.4	6.3	13
avr-11	1.5	26.3	13.0	16
mai-11	0.1	29.4	14.6	0
juin-11	5.9	36.1	16.5	44
juil-11	6.5	27.3	15.7	63
août-11	6.5	29.7	17.3	110
sept-11	7.1	29.9	16.2	18
oct-11	-0.9	26.2	11.4	25
nov-11	-3.3	18.8	7.7	3
déc-11	0	12.0	5.4	121
janv-12	-9.1	12.8	4.2	69
févr-12	-17.9	10.0	-1.3	23
mars-12	-0.4	20.9	8.1	10
avr-12	-2.6	21.8	8.1	45
mai-12	0.6	27.9	14.3	71

juin-12	4.2	30.2	15.3	87
juil-12	8.8	28.0	18.4	116
août-12	9.5	34.7	18.6	25
sept-12	4.9	28.3	13.7	27
oct-12	-2.3	21.6	10.3	102
nov-12	0.9	13.6	6.9	25
déc-12	-4.1	12.9	4.5	90.6
janv-13	-10.5	12.9	1.5	38.3
févr-13	-5.4	8.8	0.6	29.4
mars-13	-15.5	17.3	2.3	17.7
avr-13	-4.6	25.0	8.6	20.1
mai-13	0.8	23.8	11.2	83.7
juin-13	5.7	30.5	15.6	41.8

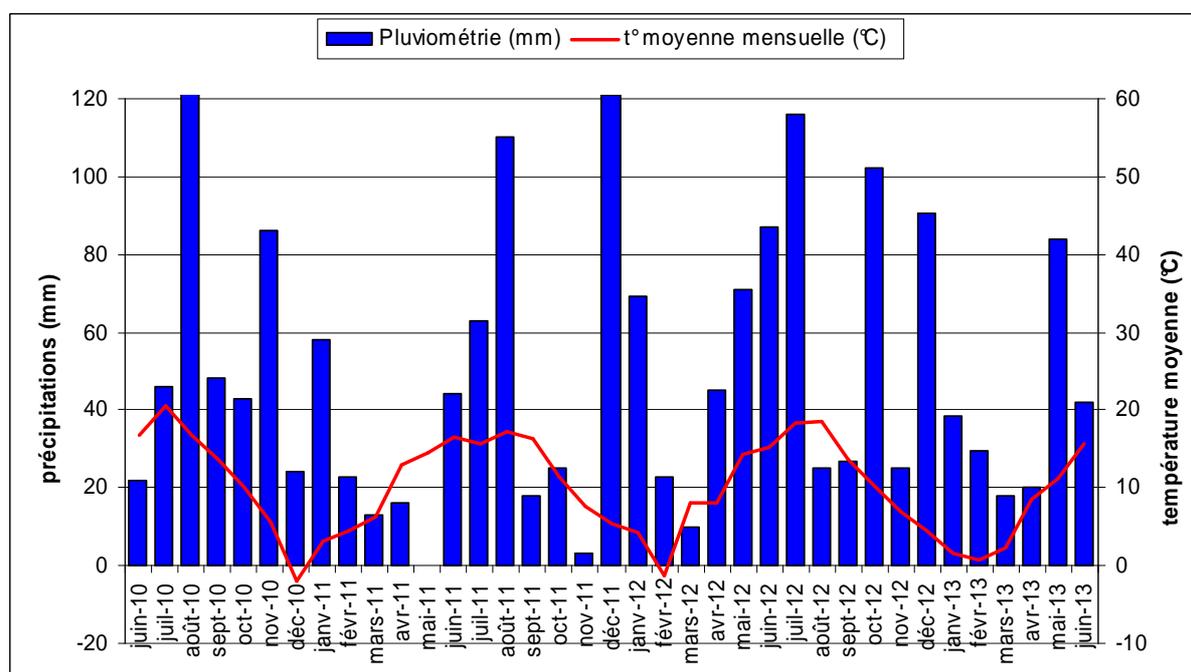


Figure 8. Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de mesure de Geer (juin 2010 – juin 2013)

4.2 Déficit hydrique

La Figure 9 illustre l'évapotranspiration potentielle et le déficit hydrique ($P - ETP$) calculés à partir des observations réalisées à la station de mesure de l'usine Hesbaye Frost S.A. à Geer. L'évapotranspiration a été calculée à partir de la formule empirique de Thornthwaite (1948) qui ne nécessite que la connaissance de la température moyenne mensuelle.

On peut voir que globalement de juin à octobre 2010, on entre dans une phase de déficit hydrique ($P < ETP$), à l'exception du mois d'août au cours duquel les précipitations furent surtout sous forme orageuse, ne permettant pas la remise à saturation du sol. A partir de novembre 2010, on entre dans une phase d'excès hydrique ($P > ETP$), permettant la reprise de la percolation dans les lysimètres.

L'année 2011 a été marquée par un déficit hydrique assez prononcé. Les lysimètres entrent en phase de déficit hydrique dès le mois de mars, entraînant leur tarissement progressif au mois d'avril. Seules les pluies abondantes du mois d'août ont permis de repasser en bilan hydrique (P – ETP) légèrement positif, insuffisant cependant pour causer une reprise de la percolation. Un déficit hydrique a été observé tout au long de l'automne (avec une sécheresse marquée en novembre); ceci explique que les lysimètres sont restés à sec durant cette période. Il a fallu attendre le mois de janvier 2012, suite à un mois de décembre 2011 pluvieux, pour assister à la reprise tardive de la percolation à l'exutoire des lysimètres.

L'année 2012 a été marquée par un déficit hydrique dès le mois de mars jusqu'au mois de septembre. Ce déficit est cependant resté limité jusqu'au mois de juillet en raison notamment des pluies abondantes de juin et juillet, pouvant expliquer qu'on n'observe pas de réel tarissement des lysimètres à cette période. En revanche, le déficit hydrique est beaucoup plus marqué aux mois d'août et de septembre, causant l'arrêt de la percolation dans les lysimètres durant ces mois. La reprise progressive de la percolation dans les lysimètres s'observe au cours du mois de novembre, suite à un mois d'octobre particulièrement pluvieux.

Au cours de l'année 2013, les lysimètres ont percolé jusqu'au mois d'avril, reflétant une phase d'excès hydrique. Une légère reprise de la percolation a été observée au début du mois de juin, suite aux pluies abondantes de la fin du mois de mai.

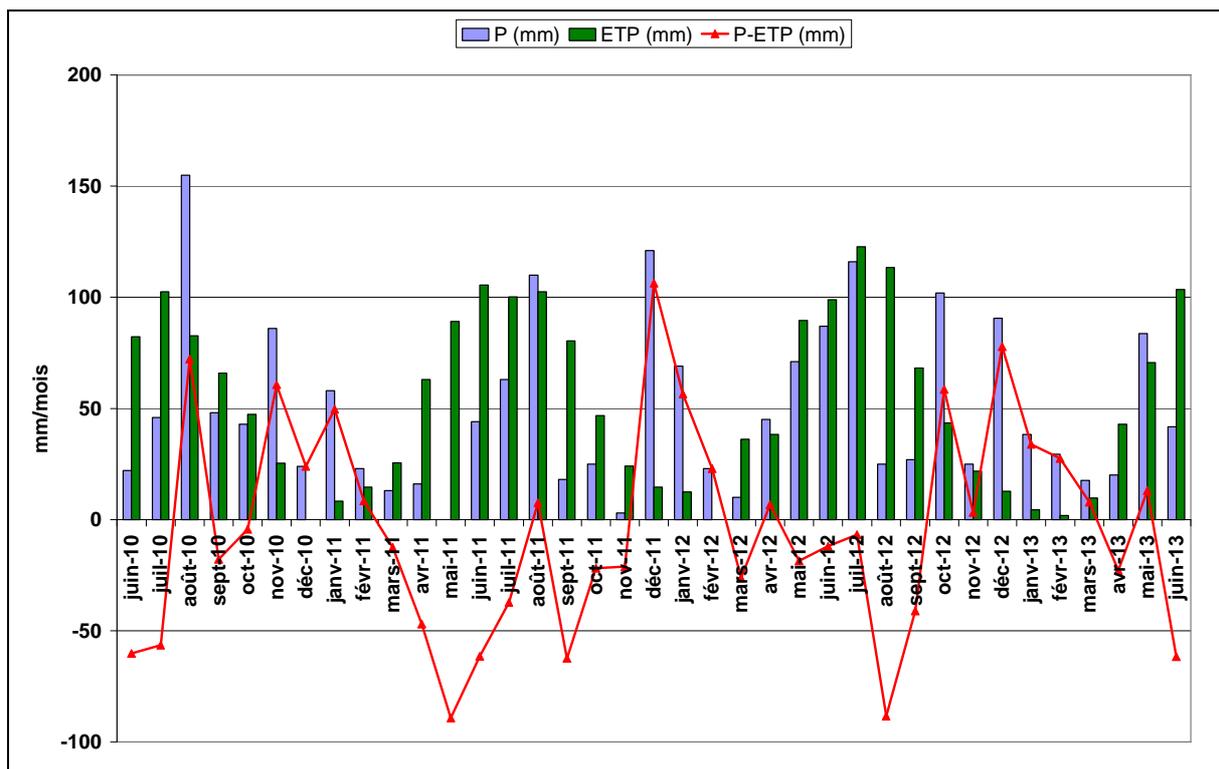


Figure 9. Pluviométrie, évapotranspiration potentielle et déficit hydrique (juin 2010 – juin 2013) à la station de mesure de Geer

5 Programme d'irrigation

Les irrigations réalisées sur les parcelles suivies en 2010, 2011 et 2012 sont reprises aux Tableau 5, Tableau 6 et Tableau 7 respectivement. Il est très difficile de dire ce qu'une irrigation à l'eau usée apporte en azote car lorsque la demande est forte, l'irrigation se fait à l'eau de puits et à l'eau usée simultanément. Une irrigation uniquement à l'eau usée ne pouvant apporter au maximum que 1 uN par mm d'eau, l'imprécision est donc très limitée vu les quantités d'eau apportée.

En 2010, deux parcelles (Gros Thier Bovenistier et PL3) ont été irriguées soit à l'eau claire, soit à l'eau usée provenant de l'usine Hesbaye Frost.

En 2011, trois parcelles équipées d'un lysimètre ont été irriguées à l'eau claire et une parcelle ayant fait l'objet d'un essai mais non-équipée d'un lysimètre (située à Berloz) a été irriguée à l'eau usée.

En 2012, seules deux parcelles équipées d'un lysimètre ont été irriguées à l'eau usée, reflétant le déficit hydrique limité jusqu'au mois de juillet.

En 2013, il n'y a pas eu d'irrigation sur les parcelles suivies jusqu'au mois de juin.

Tableau 5. Irrigations sur les parcelles suivies en 2010

date	culture	quantité (mm)	type
Gros Thier Bovenistier			
3-juil	poireau	20	eau claire
PL3			
21-juin	fève des marais	15	eau usée
25-juin	fève des marais	18	eau usée
1-juil	fève des marais	18	eau usée
7-juil	fève des marais	18	eau usée
31-juil	épinard d'automne	15	eau usée

Tableau 6. Irrigations sur les parcelles suivies en 2011

date	culture	quantité (mm)	type
Grosse Pierre Chemin de Fer			
16-mai	pomme de terre	20	eau claire
6-juin	pomme de terre	20	eau claire
26-juin	pomme de terre	20	eau claire
Gros Thier Bovenistier			
12-juin	haricot	15	eau claire
Sole 4			
23-avr	pépinière	15	eau claire
6-mai	pépinière	20	eau claire
21-mai	pépinière	20	eau claire
Berloz - pas de lysimètre			
14-mai	fève des marais	15	eau usée
20-mai	fève des marais	15	eau usée
27-juin	fève des marais	15	eau usée
1-août	épinard d'automne	10	eau usée

Tableau 7. Irrigations sur les parcelles suivies en 2012

date	culture	quantité (mm)	type
PL1			
1-sept	carotte	20	eau usée
PL3			
28-août	haricot	20	eau usée
4-sept	haricot	20	eau usée

6 Expérimentations et résultats

6.1 Grosse Pierre Chemin de fer

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

L'historique cultural récent de cette parcelle est le suivant :

2008 : fève des marais suivie de chou frisé
 2009 : poireau
 2010 : pois-haricot
 2011 : pomme de terre
 2012 : froment + CIPAN
 2013 : lin

19 t/ha de compost (teneur = 8,46 kg N/t) ont été épandus sur cette parcelle le 11 septembre 2012, après la moisson du froment et avant le semis d'une CIPAN.

6.1.1 2010 : pois-haricot

Le semis des pois a été effectué le 23 avril. Etant donné qu'il n'y a pas eu d'apport d'azote sur ces deux légumineuses, cette parcelle n'a pas fait l'objet d'un essai de fertilisation azotée en 2010.

Les haricots ont été récoltés le 1er octobre et les prélèvements de sol pour mesurer l'APL **sur l'ensemble de la parcelle** ont eu lieu le 18 octobre et le 6 décembre (Tableau 8). L'APL d'octobre montre des quantités d'azote nitrique relativement importantes, toutefois attendues au regard de la succession pois/haricot. La répartition dans le profil est assez homogène. L'APL de décembre montre une augmentation de la quantité d'azote nitrique présente dans les 3 couches du profil, conséquence de la minéralisation des résidus de culture des haricots et de la pluviométrie importante au cours du mois de novembre. La répartition dans le profil reste relativement homogène.

Tableau 8. APL (kg N-NO₃/ha) sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (pois + haricot) –2010

	18/10/2010	6/12/2010
0-30cm	24	29
30-60cm	29	35
60-90cm	22	32
total	75	96

Les APL mesurés sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer en 2010 sont qualifiés de bon en octobre et de limite en décembre, par rapport à l'APL de référence en légumes (classe A7).

6.1.2 2011 : pomme de terre

En 2011, il a été décidé de tester sur cette parcelle l'impact d'une CIPAN en interculture courte après pomme de terre plutôt que de faire un essai sur la fertilisation azotée en pomme de terre. En effet, celle-ci peut être pilotée efficacement par des outils tels que le chlorophyllomètre, outils cependant difficilement applicables à l'échelle d'un petit parcellaire

expérimental. En revanche, la gestion de l'interculture après pomme de terre reste une problématique dont il convient de tester l'impact sur le reliquat azoté en début de période de lixiviation.

Les pommes de terre ont été plantées le 4 avril et récoltées le 5 septembre. Une moutarde a été semée le 9 septembre sur 4 sous-parcelles de l'essai (P1, P3, P6, P8, plus la sous-parcelle à l'aplomb du lysimètre - Figure 3). La moutarde a été détruite le 16 octobre lors du semis du froment sur l'ensemble de la parcelle.

Un prélèvement de sol pour mesurer le reliquat azoté post récolte autour de l'essai a été réalisé le 8 septembre (Tableau 9). Un deuxième prélèvement de sol pour mesurer l'impact de la moutarde sur les reliquats azotés a eu lieu le 13 octobre. Enfin, sur l'ensemble de la parcelle (à l'exception de l'essai), un prélèvement de sol a été effectué le 27 octobre.

Tableau 9. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (pomme de terre) -2011

	08/09/2011	13/10/2011		27/10/2011
	Autour de l'essai	Sous-parcelles de l'essai		Parcelle entière (sauf essai)
	Après pomme de terre	Après CIPAN	Sol nu	Sol nu
0-30cm	58	32	79	102
30-60cm	25	32	50	50
60-90cm	13	18	21	25
total	96	82	150	177
	Gr. statistique	a	b	

On peut voir que le reliquat azoté était assez important après la récolte des pommes de terre et qu'il était principalement localisé dans les 30 premiers centimètres de sol. Le 13 octobre, l'impact de la moutarde sur le reliquat azoté était particulièrement visible : la moutarde a prélevé près de 70 kg N-NO₃⁻/ha en un peu plus d'un mois! Alors que l'APL moyen mesuré sur les sous-parcelles avec CIPAN s'élevait à 82 kg N-NO₃⁻/ha, celui sur les sous-parcelles sans CIPAN s'élevait à 150 kg N-NO₃⁻/ha. La différence d'APL se marque principalement dans la couche 0-30cm ainsi que dans la couche 30-60cm, conséquence d'une minéralisation importante occasionnée par des conditions de température et d'humidité propices. Cette différence est considérée comme significative, au sens du test statistique de Newman et Keuls⁷ (avec un degré de signification $\alpha = 5\%$).

On peut signaler que l'efficacité du piégeage de l'azote par la moutarde résulte du bon développement de celle-ci, favorisé par les conditions optimales rencontrées cette année (humidité après la moisson et douceur automnale). Si de telles conditions n'avaient pas été rencontrées, il est probable que les résultats auraient été différents...

Sur l'ensemble de la parcelle (à l'exception du parcellaire expérimental), le sol n'a pas été couvert entre la récolte des pommes de terre et le semis du froment. On peut voir (Tableau 9) que l'APL du 27 octobre était élevé et principalement localisé dans la couche 0-30cm. Il est

⁷ Test statistique de comparaison de plusieurs moyennes considérées sur pied d'égalité, sans témoin. Dans la suite du document, toutes les comparaisons de moyennes ont été réalisées grâce à ce test, avec un degré de signification $\alpha = 5\%$

probable que le froment semé quelques jours auparavant n'ait pu prélever qu'une partie de cette quantité d'azote et que le reste se soit retrouvé à terme dans les eaux souterraines.

La date du prélèvement de sol (13/10) se situant hors de la plage de mesure de l'APL de référence (avant le 15/10), il n'est normalement pas possible de comparer les reliquats azotés mesurés sur cette parcelle à l'APL de référence 2011. La Figure 10 montre cependant que, à deux jours près, le reliquat azoté mesuré sur le parcellaire expérimental sans CIPAN aurait été qualifié de limite, tandis que le reliquat azoté mesuré sur le parcellaire expérimental avec CIPAN aurait été qualifié de bon.

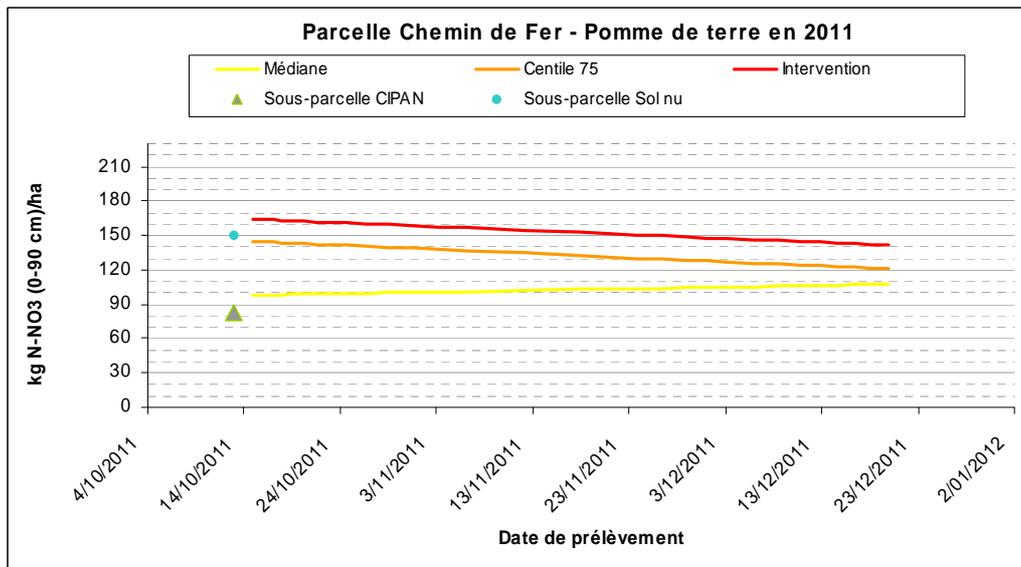


Figure 10. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Chemin de Fer et APL de référence 2011 en pomme de terre (classe A5)

En conclusion, la moutarde semée en interculture courte entre la pomme de terre et le froment a parfaitement rempli son rôle de CIPAN en prélevant 70 kg N-NO₃/ha en un peu plus d'un mois. Les conditions favorables de septembre et de début octobre ont favorisé ce prélèvement. Par contre, les APL mesurés sur sol nu, dans l'essai et le reste de la parcelle, montrent des quantités élevées d'azote nitrique au moment du semis du froment, en raison des conditions favorisant une minéralisation importante.

6.1.3 2012 : froment

Cette parcelle avait fait l'objet en 2011 d'un essai de gestion de l'interculture entre la récolte de pomme de terre et le semis d'un froment (cf. §6.1.2). Une moutarde avait été semée sur une partie du parcellaire expérimental tandis que l'autre partie du parcellaire était restée en sol nu.

L'impact de la moutarde semée en interculture courte en 2011 a été mesuré au niveau du reliquat azoté en sortie d'hiver et sur le rendement et la qualité du froment implanté sur cette parcelle en 2012.

Le froment a été semé sur l'ensemble de la parcelle (y compris le parcellaire expérimental) le 16 octobre 2011 et récolté le 13 août 2012. Un prélèvement de sol a été réalisé sur le parcellaire expérimental le 6 mars afin de mesurer l'impact de la moutarde sur le reliquat

azoté en sortie d'hiver (Tableau 10). Une différence non significative de 15 kg N-NO₃⁻/ha se marque entre les deux objets de l'essai (moutarde ou sol nu). Cette différence se marque principalement dans les couches 30-60cm et 60-90cm. Pour rappel, une différence significative de près de 70 kg N-NO₃⁻/ha (82 kg N-NO₃⁻/ha après moutarde ; 150 kg N-NO₃⁻/ha après sol nu) était observée entre les deux objets avant le semis du froment. Cette différence s'est donc estompée au cours de l'hiver, en partie en raison du prélèvement par le froment en place mais en raison également de la lixiviation du nitrate à cette période. 170 UN (50UN - 60 UN - 60UN) ont ensuite été appliquées sur l'ensemble de la parcelle (y compris le parcellaire expérimental).

Un second prélèvement de sol a été réalisé le 20 août après la récolte du froment (Tableau 10). La faible différence de reliquat azoté (4 kg N-NO₃⁻/ha) entre les deux objets n'est pas significative. Le reliquat azoté est localisé principalement en surface.

Tableau 10. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (froment) - 2012

	6/3/2012		20/8/2012	
	Sous-parcelles de l'essai		Sous-parcelles de l'essai	
	Froment après moutarde	Froment après sol nu	Post-récolte froment après moutarde	Post-récolte froment après sol nu
0-30cm	7	8	28	24
30-60cm	13	20	9	9
60-90cm	23	30	1	1
total	43	58	38	34
Gr. Statistique	a		a	

Le rendement du froment et la qualité de la récolte ont également été mesurés sur cette parcelle (Tableau 11). Quatre paramètres ont été mesurés:

- le rendement ramené à 15% d'humidité ;
- le poids spécifique ramené à 15% d'humidité ;
- le taux de protéines ;
- l'indice de Zéleny.

On peut voir que les différences entre les deux objets sont faibles ; ceci est confirmé par l'analyse statistique qui ne révèle de différence significative pour aucun des paramètres mesurés. Tout au plus a-t-on pu remarquer un léger décalage dans les stades de développement du froment, qui ne s'est pas marqué sur le rendement.

Tableau 11. Rendement et qualité de la récolte sur le parcellaire expérimental de la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (froment) - 2012

	Moutarde	Sol nu
Rendement (kg/ha)	7735	8047
	a	
Poids spécifique (kg/hl)	73,0	73,2
	a	
Protéines (%)	13,2	13,0
	a	
Zéleny (%)	61,0	59,4
	a	

En conclusion, l'impact du semis d'une moutarde entre la récolte d'une pomme de terre et un froment s'est marqué uniquement sur le reliquat azoté mesuré dans le sol au moment du semis du froment. En sortie d'hiver, la différence de reliquat azoté n'est plus significative, indiquant que la moutarde a permis de limiter la lixiviation du nitrate durant l'hiver par rapport à la partie du parcellaire restée en sol nu. La moutarde n'a pas eu d'impact significatif sur le rendement et la qualité du froment.

Suite à la récolte du froment, 19 t/ha de compost (teneur = 8,46 kg N/t) ont été épandus le 11 septembre. Un trèfle d'Alexandrie a été semé le 18 septembre sur les sous-parcelles P2, P4, P5 et P7 (Figure 3) tandis qu'un mélange de trèfle d'Alexandrie et d'avoine brésilienne a été semé sur les sous-parcelles P1, P3, P6, P8 et à l'aplomb du lysimètre. Une moutarde a été semée sur l'ensemble de la parcelle à l'exception du parcellaire expérimental et d'une zone de 6 m autour de ce parcellaire restée en sol nu.

Un prélèvement de sol a été réalisé le 3 décembre sur le parcellaire expérimental ainsi qu'autour de celui-ci (en sol nu et en moutarde) afin de mesurer l'impact des différentes CIPAN implantées sur cette parcelle (Tableau 12). Sans surprise, le reliquat azoté le plus élevé est observé dans la partie restée en sol nu autour de l'essai ; les reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental après trèfle d'Alexandrie et un mélange trèfle d'Alexandrie – avoine brésilienne sont légèrement plus faibles, sans que cette différence ne soit considérée comme significative, appartenant au même groupe statistique. En revanche, le reliquat azoté mesuré après la moutarde est significativement plus faible que sur les autres objets de l'essai.

Par rapport à l'essai mené sur la parcelle PL1 en 2011 (cf. §6.3.2), on retrouve l'absence de différence significative entre les reliquats azotés mesurés après un trèfle d'Alexandrie et ceux mesurés après un mélange trèfle d'Alexandrie – avoine brésilienne. Par contre, le prélèvement d'azote par les couverts est plus faible cette année sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer qu'en 2011 sur la parcelle PL1. Alors que les CIPAN avaient prélevé de 40 à 55 kg N-NO₃⁻/ha en 2011, elles n'en ont prélevé que 15 cette année. Ceci peut être expliqué par le faible développement des CIPAN cette année, conséquence de la date tardive de semis de ces CIPAN.

Tableau 12. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (CIPAN après froment) - 2012

	3/12/2012			
	Sous-parcelles de l'essai		Autour de l'essai	
	Trèfle d'Alexandrie	Trèfle d'Alexandrie – Avoine brésilienne	Sol nu	Moutarde
0-30cm	13	10	17	4
30-60cm	24	25	34	3
60-90cm	24	24	25	3
total	61	59	76	10
Gr. statistique	a			b

Les APL mesurés sur cette parcelle sont comparés à l'APL de référence de 2012 en céréale avec CIPAN (classe A2 - Figure 11). Les APL mesurés sur la parcellaire expérimental après le trèfle d'Alexandrie et après le mélange trèfle/avoine sont non-conformes, conséquence du faible développement de ces couverts. Par contre, l'APL mesuré après moutarde est qualifié de bon.

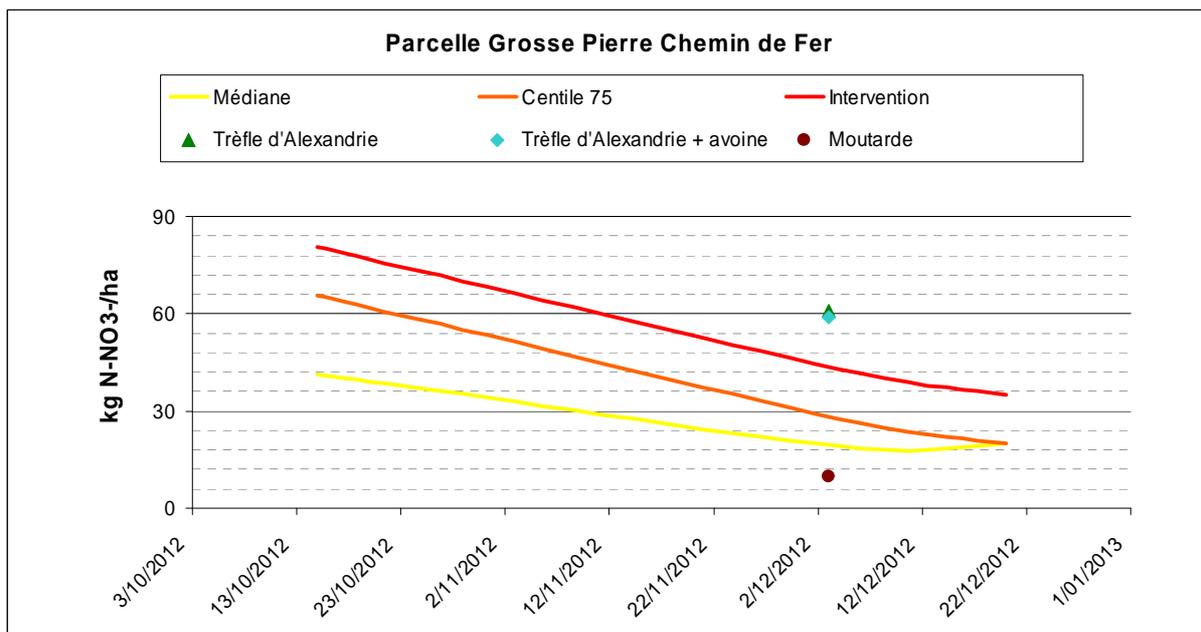


Figure 11. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Chemin de Fer et APL de référence 2012 en céréale avec CIPAN (classe A2)

En conclusion, sur le parcellaire expérimental de cette parcelle en 2012, on n'observe pas de différence significative entre le reliquat azoté mesuré après un trèfle d'Alexandrie et le reliquat azoté mesuré après un mélange de trèfle d'Alexandrie et d'avoine brésilienne, tout comme cela avait déjà été observé sur la parcelle PL1 en 2011. Les différences de reliquats azotés par rapport au sol nu ne sont pas significatives, soulignant un faible développement de ces CIPAN sur le parcellaire expérimental après un semis tardif. En revanche, le reliquat azoté mesuré après moutarde est significativement plus faible.

6.1.4 2013 : lin

En 2013, un lin a été semé sur cette parcelle. Aucune expérimentation n'a été menée.

6.1.5 Analyse des percolats

Les données de pluviométrie sont fournies par la station météorologique située sur le site de la S.A. Hesbaye Frost à Geer (cf §4).

Au cours de la saison de drainage 2010-2011, la percolation a repris au mois de novembre 2010 (Tableau 13). Les prélèvements n'ont pas été possibles en décembre en raison du gel persistant qui a empêché l'ouverture de la chambre de visite. Les volumes récoltés ont été importants (73l) au cours du mois de janvier 2011, suite à des précipitations importantes et à la fonte des neiges de décembre. Les volumes récoltés ont ensuite diminué régulièrement jusqu'au mois de juin. Au final, sur toute la période de drainage, 18% de la pluviométrie a été récoltée à l'exutoire du lysimètre. Ce pourcentage est comparable à ceux observés au cours des années précédentes sur ce lysimètre. Les teneurs en nitrate restaient assez élevées (109 mg NO_3^-/l en moyenne), principalement en début de saison de drainage, mais étaient en diminution par rapport aux années précédentes⁸.

Au cours de la saison de drainage 2011-2012, la percolation a repris au mois de décembre 2011. La saison de drainage a été relativement courte, le lysimètre se tarissant dès le mois de mars 2012. Les volumes récoltés au cours de cette saison de drainage étaient assez faibles (36l), représentant 6% de la pluviométrie mesurée durant cette période. Cette valeur est plus faible que les années précédentes et peut s'expliquer en partie par une couverture de sol permanente (pomme de terre – moutarde – froment) durant l'automne et l'hiver 2011 – 2012. La teneur moyenne en nitrate (78 mg NO_3^-/l) était en diminution par rapport aux saisons de drainages précédentes. Compte tenu des faibles volumes récoltés, la quantité d'azote nitrique lixivié vers les eaux souterraines était assez faible (6,6 kg N- NO_3^-/ha).

La saison de drainage 2012-2013 a repris à la fin du mois d'octobre 2012 suite aux pluies abondantes de ce mois. La concentration mesurée en octobre est élevée (205 mg NO_3^-/l) mais est à relativiser compte tenu du faible volume récolté. Par la suite, on observe une diminution des concentrations, avec au final une valeur moyenne pondérée de 61 mg NO_3^-/l pour cette saison de drainage. Les volumes récoltés sont importants (122l), représentant 26% de la pluviométrie totale sur cette période ; le faible développement des CIPAN sur le parcellaire expérimental peut être une partie d'explication. Une reprise de la percolation a été observée au mois de juin 2013 à la suite d'un mois de mai pluvieux.

⁸ Pour rappel, d'importants flux de nitrate vers les eaux souterraines ont été observés dans ce lysimètre de 2008 à 2010 suite à un apport de compost qui s'est révélé beaucoup plus riche que prévu à posteriori – cf. rapport d'activités de la convention précédente (Deneufbourg et al, 2010b)

Tableau 13 : Parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie	Irrigation	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(mm)	(l)	(mg NO ₃ -/l)	(kg N-NO ₃ /ha)
Septembre 2010	48	-	0	-	-
Octobre	43	-	0,2	246	0,1
Novembre	86	-	16,3	114	4,2
Décembre	24	-	-	-	-
Janvier 2011	58	-	72,6	106	17,4
Février	23	-	13,7	122	3,8
Mars	13	-	2,3	89	0,5
Avril	16	-	0,5	79	0,1
Mai	0	20	0,2	96	0,0
Juin	44	40	0,1	77	0,0
Juillet	63	-	0	-	-
Août	110	-	0	-	-
DRAINAGE 2010-2011	528	60	105,9	109	26,1
Septembre	18	-	0	-	-
Octobre	25	-	0	-	-
Novembre	3	-	0	-	-
Décembre	121	-	18,6	73	3,1
Janvier 2012	69	-	16,1	82	3
Février	23	-	0,9	100	0,2
Mars	10	-	0,4	113	0,3
Avril	45	-	0	-	-
Mai	71	-	0	-	-
Juin	87	-	0	-	-
Juillet	116	-	0	-	-
Août	25	-	0	-	-
DRAINAGE 2011-2012	613	0	36	78	6,6
Septembre 2012	27	-	0	-	-
Octobre	102	-	0,2	205	0,1
Novembre	25	-	9,4	84	1,8
Décembre	91	-	22,5	54	2,7
Janvier 2013	38	-	30,5	63	4,3
Février	29	-	41,2	65	6,1
Mars	18	-	6,8	50	0,8
Avril	20	-	7,1	41	0,7
Mai	84	-	0	-	-
Juin	42	-	4,0	34	0,1
DRAINAGE 2012-2013	476	0	121,7	61	16,8

6.1.6 Synthèse

La Figure 12 résume les mesures et observations pour la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer. Cette figure reprend pour les mois d'août 2008 à juin 2013 les volumes d'eau récoltée dans les lysimètres (données cumulées) en parallèle avec le drainage potentiel cumulé (= pluie – évapotranspiration potentielle), les teneurs en nitrate mesurées dans l'eau de percolation ainsi que les profils azotés établis à l'aplomb du lysimètre. Les saisons culturales et les apports azotés à l'aplomb du lysimètre sont repris sous le graphique.

En 2010, cette parcelle a été cultivée d'un pois suivi d'un haricot, cultures qui n'ont pas reçu de fertilisation azotée. Les APL obtenus sont d'un ordre de grandeur attendu pour ce type de culture (75 et 96 kg N-NO₃⁻/ha), suite à la minéralisation des résidus de culture du haricot. Lors de la saison de drainage suivante, les teneurs en nitrate dans l'eau de percolation sont toujours en diminution par rapport aux mois précédents et sont de l'ordre de 100 mg NO₃⁻/l.

La Figure 12 met en évidence que la moutarde semée sur le parcellaire expérimental en 2011 après la récolte des pommes de terre a permis de limiter l'APL (82 kg N-NO₃⁻/ha) avant le semis d'un froment. Les volumes récoltés durant la saison de drainage qui a suivi la récolte des pommes de terre sont assez faibles (moins de 50l au total). Les concentrations en nitrate dans l'eau de percolation (78 mg NO₃⁻/l en moyenne) sont d'un ordre de grandeur tout à fait comparable à l'APL mesuré en octobre 2011. Le semis d'une moutarde en interculture courte entre la récolte de pommes de terre et le semis d'un froment n'a donc permis de limiter que partiellement le risque de pollution des eaux de percolation, les concentrations restant relativement élevées en valeur absolue. Ce constat avait déjà été établi sur la parcelle Sole 4 en 2009 (cf. §6.5.6).

De manière globale, entre 2008 et 2011, on voit que quatre cultures pouvant laisser des APL élevés (par minéralisation des résidus de culture notamment) ont été implantées sur cette parcelle. Le conseil de fertilisation a toujours été respecté (voire diminué) et, de manière globale, les APL étaient plutôt bons compte tenu des cultures en place. Malheureusement, en 2009 et 2010, l'impact de ces cultures sur la qualité de l'eau de percolation était masqué en raison de l'accident de fertilisation survenu en 2006 (Deneufbourg et al., 2010). Jusque début 2013, les concentrations mesurées à l'exutoire de ce lysimètre n'étaient jamais descendues sous les 50 mg NO₃⁻/l. Pour ce type de cultures "à risques" au niveau des APL, on voit qu'il est donc nécessaire au minimum de raisonner la fertilisation et d'adapter les modes de gestion de l'interculture, voire de modifier les successions culturales si l'on veut réduire les pertes de nitrate vers les eaux souterraines.

Les concentrations dans les eaux récoltées au cours de l'hiver 2012-2013 sont en baisse suite à la culture d'un froment suivie d'un mélange de trèfle d'Alexandrie et d'avoine brésilienne sur cette parcelle en 2012 (à l'exception du premier échantillon dont la concentration dépassait 200 mg NO₃⁻/l, ce qui est imputable à la reprise de la percolation et au faible volume récolté). Même si le mélange trèfle – avoine était peu développé sur l'essai en 2012, laissant un APL moyen (59 kg N-NO₃⁻/ha), ce couvert a permis d'abaisser les concentrations dans l'eau de percolation sous les 50 mg NO₃⁻/l dès le mois d'avril 2013.

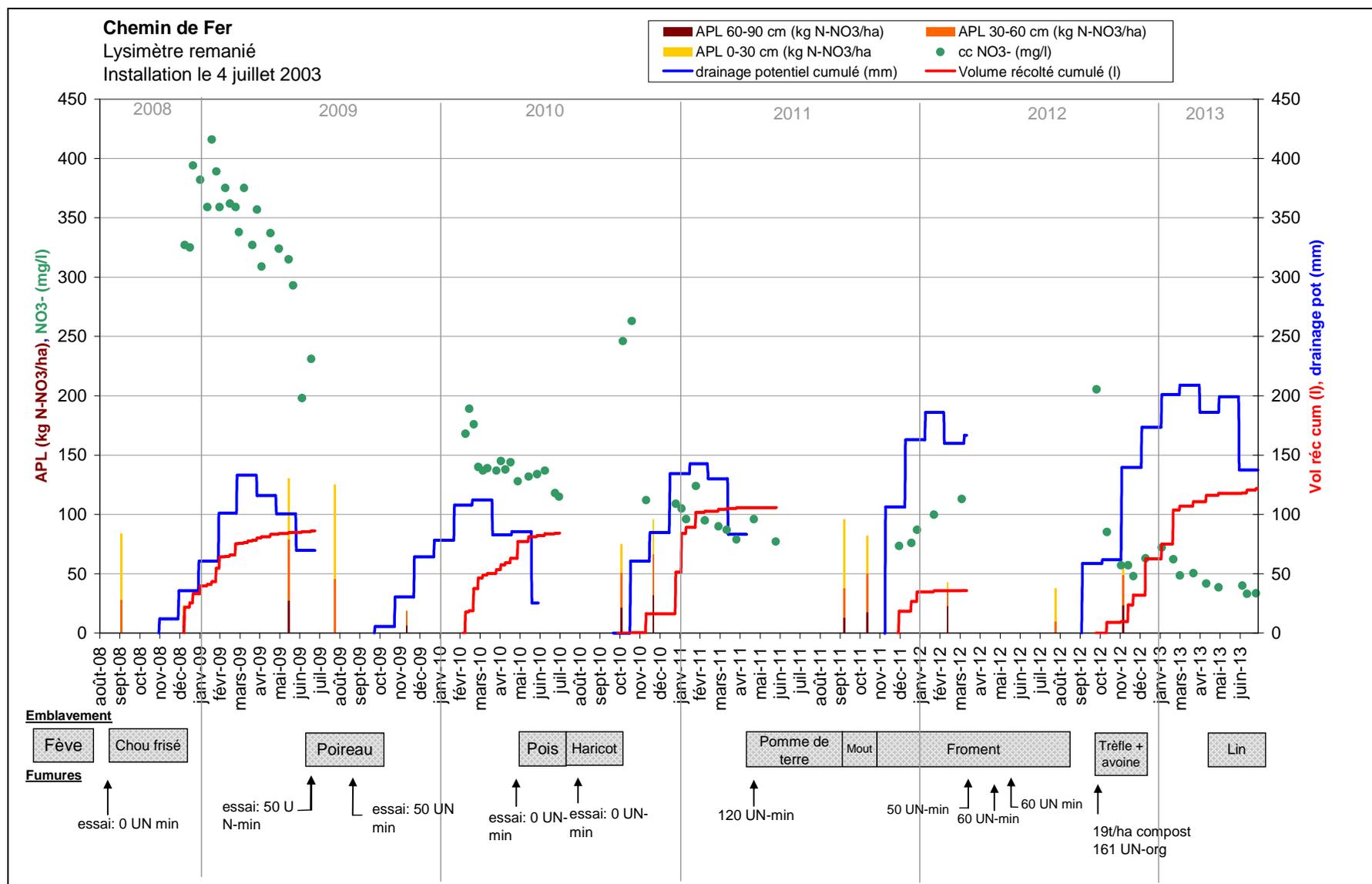


Figure 12. Synthèse des mesures et observations, parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer

6.2 Gros Thier Bovenistier

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

L'historique cultural récent de cette parcelle est le suivant :

2008 : froment suivi de moutarde
 2009 : fève des marais suivie d'épinard d'automne
 2010 : poireau
 2011 : haricot
 2012 : betterave
 2013 : carotte

6.2.1 2010 : poireau

Les poireaux ont été repiqués le 1^{er} juillet 2010 sur cette parcelle. Les sous-parcelles de l'essai sont de dimension 8x5m et sont séparées par des chemins d'une largeur de 1m. (Figure 3).

Deux profils azotés ont été établis en vue du conseil de fumure, avant le repiquage des poireaux (24 juin) et en cours de culture (7 septembre). Etant donné les quantités importantes d'azote présentes dans le sol au moment des prélèvements (Tableau 14), il a été décidé de ne pas appliquer d'azote à ce moment sur le parcellaire expérimental. Un nouveau profil azoté a été établi le 9 février 2011 (Tableau 15). On peut voir que les poireaux ont prélevé une quantité importante d'azote nitrique au cours de l'automne et de l'hiver, avec une diminution de 250 et 270 kg N-NO₃⁻/ha entre septembre 2010 et février 2011, laissant un profil pauvre en azote nitrique. Suite à ce profil, un scénario 0 UN a été testé sur les sous-parcelles P1, P3, P6, P8 (ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre), tandis qu'une fraction de 50 UN minéral a été appliquée sur les sous-parcelles P2, P4, P5, P7 le 28 février 2011. Lorsque les profils sont peu chargés en azote en février (comme c'est le cas sur cette parcelle), on recommande en effet généralement une application de 50 kg N/ha pour relancer la végétation le plus tôt possible.

Tableau 14. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (poireaux) - 2010

	24/06/2010		7/9/2010	
	0 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	50 UN à appliquer sur 4 sous-parcelles	0 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	50 UN à appliquer sur 4 sous-parcelles
0-30cm	102	93	121	104
30-60cm	48	44	111	105
60-90cm	56	57	57	58
total	206	194	289	267

Tableau 15. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (poireaux) - 2011

	9/2/2011		28/3/2011	
	0 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	50 UN à appliquer sur 4 sous-parcelles	0 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	50 UN appliquées sur 4 sous-parcelles
0-30cm	4	4	4	23
30-60cm	4	4	4	4
60-90cm	7	5	3	5
total	15	13	11	32
	Gr. statistique		a	

Les poireaux ont été récoltés le 28 mars à l'aplomb du lysimètre et le prélèvement de sol pour mesurer le reliquat azoté post-récolte sur les sous-parcelles a eu lieu ce même jour (Tableau 15). On peut voir qu'une partie des 50 UN appliquées sur quatre sous-parcelles de l'essai un mois plus tôt n'a pas été prélevée par les poireaux et que cette partie (20UN) se retrouve dans les 30 premiers centimètres de sol à la récolte. Cette différence n'est cependant pas considérée comme significative par l'analyse statistique.

Compte tenu de la récolte tardive des poireaux, il n'a pas été possible de comparer les reliquats azotés mesurés sur cette parcelle avec l'APL de référence 2010.

Pour chaque sous-parcelle, le rendement et le poids moyen par poireau ont été quantifiés individuellement (Tableau 16).

Tableau 16. Rendements et poids moyen par poireau obtenus sur l'essai de la parcelle Gros Thier Bovenistier (poireau) - 2010

Fumure appliquée (kg N/ha)	0 UN	50 UN
Rendement (T/ha)	61,0	59,1
	a	
Poids moyen par poireau (g)	338	332
	a	

L'analyse statistique révèle que les différences de rendement observées entre les deux objets testés ne sont pas significatives.

En conclusion, sur cette parcelle et dans les conditions (culturelles, climatiques,...) de 2010 et début 2011, l'apport d'une fraction de 50 kg N/ha un mois avant la récolte des poireaux n'a pas engendré de gain de rendement ni de qualité de la récolte ; de plus, une partie de cette fraction se retrouvait dans le sol à la récolte. Cette fraction s'est donc révélée inutile à posteriori.

6.2.2 2011 : haricot

Deux essais ont été mis en place sur cette parcelle en 2011. Un premier essai a testé l'impact d'une réduction du conseil de fertilisation en haricot et un second essai a testé l'impact du semis d'une moutarde après le haricot.

Les haricots ont été semés le 11 juin et ont été récoltés le 6 septembre. Deux tiers de la parcelle de l'agriculteur ont été semés d'un pois avant le haricot, le tiers restant (où se situe le parcellaire expérimental) étant toujours occupé par le poireau de la saison précédente lors du semis de ce pois.

Un prélèvement de sol a été effectué le 27 mai en vue du conseil de fumure (Tableau 17). Suite à celui-ci, un scénario 0 UN a été testé sur les sous-parcelles P1, P3, P6 et P8 (ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre) (Figure 3), tandis que 37 UN ont été appliquées sur les sous-parcelles P2, P4, P5 et P7 le 16 juin. A titre de comparaison, l'agriculteur a appliqué 46 UN sur la partie de sa parcelle sans pois (à l'exception du parcellaire expérimental).

Un second prélèvement de sol a été effectué le 6 septembre, après la récolte des haricots (Tableau 17). Il apparaît que le reliquat azoté moyen post-récolte est deux fois plus élevé sur les sous-parcelles ayant reçu un apport de 37 UN que sur les sous-parcelles n'ayant pas reçu d'apport azoté. Cette différence est statistiquement significative. Le reliquat azoté est principalement localisé dans la couche 0-30cm.

Tableau 17. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (haricot) - 2011

	27/05/2011		06/09/2011	
	En vue du conseil		0 UN appliquées sur 5 sous-parcelles	37 UN appliquées sur 4 sous-parcelles
0-40cm	60	0-30cm	21	60
		30-60cm	15	18
		60-90cm	11	12
total	60	total	47	90
		Gr. stat.	a	b

Les rendements obtenus sur le parcellaire expérimental sont présentés au Tableau 18. Le rendement obtenu sur les sous-parcelles sans apport d'azote (10,6 T/ha) est légèrement supérieur à celui obtenu sur les sous-parcelles qui ont reçu un apport de 37 UN (9,3 T/ha), tout comme le rapport grain/gousse. Ces différences ne sont cependant pas considérées comme significatives par l'analyse statistique. Globalement, la parcelle a subi une attaque de mouches après la levée qui s'est traduite par un retard de croissance et une perte de plants. Suite à cette attaque, la culture est restée hétérogène et n'a donc pu exprimer pleinement son potentiel de rendement. L'excès de pluviométrie du mois d'août n'a également pas été favorable à la floraison. A titre de comparaison, le rendement obtenu sur l'ensemble de la parcelle n'est que de 6,4t/ha, soit la moitié d'un rendement normal. L'apport de 37 UN sur le parcellaire expérimental n'a donc pas pu être valorisé par le haricot. Les reliquats azotés post-récolte le confirment pleinement.

Tableau 18. Rendements et rapports grain/gousse obtenus sur l'essai de la parcelle Gros Thier Bovenistier (haricot) - 2011

Fumure appliquée (kg N/ha)	0 UN	37 UN
Rendement (T/ha)	10,6	9,3
	a	
Grain/gousse	9,7	8,8
	a	

La deuxième partie de l'essai sur cette parcelle concernait l'implantation d'une CIPAN après la récolte du haricot. Une moutarde a été semée le 12 septembre sur les sous-parcelles P1, P3, P6 et P8 (ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre) (Figure 3). Ces sous-parcelles sont celles qui n'avaient pas reçu d'apport azoté sur haricot. La moutarde a été broyée le 28 novembre et un profil azoté a été établi le même jour (Tableau 19).

On voit que la différence d'APL sur les sous-parcelles avec ou sans moutarde est importante (~80 kg N-NO₃⁻/ha); cette différence est d'ailleurs considérée comme significative par l'analyse statistique. La différence est particulièrement marquée dans la couche 0-30cm, avec plus de 60 kg N-NO₃⁻/ha de différence. La situation sur le reste de la parcelle (fertilisation = 46 UN et sol nu après la récolte) est intermédiaire avec un APL de 70 kg N-NO₃⁻/ha. Il faut toutefois rappeler que les deux tiers de la parcelle n'ont pas reçu d'azote car le haricot a été semé après un pois.

Tableau 19. APL (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (haricot) - 2011

	28/11/2011		30/11/2011
	Sous-parcelles de l'essai		Parcelle entière (sauf essai)
	Après moutarde	Sol nu	Sol nu
0-30cm	8	69	33
30-60cm	11	28	18
60-90cm	16	20	19
total	35	117	70
Gr. stat.	a	b	

Les APL mesurés sur le parcellaire expérimental ont été comparés à l'APL de référence de 2011 en légumes (classe A7 - Figure 13). L'APL mesuré sur le parcellaire expérimental sans CIPAN et application de 37UN est qualifié de mauvais, tandis que la réduction du conseil de fertilisation et le semis d'une moutarde après haricot ont permis d'obtenir un APL qualifié de bon.

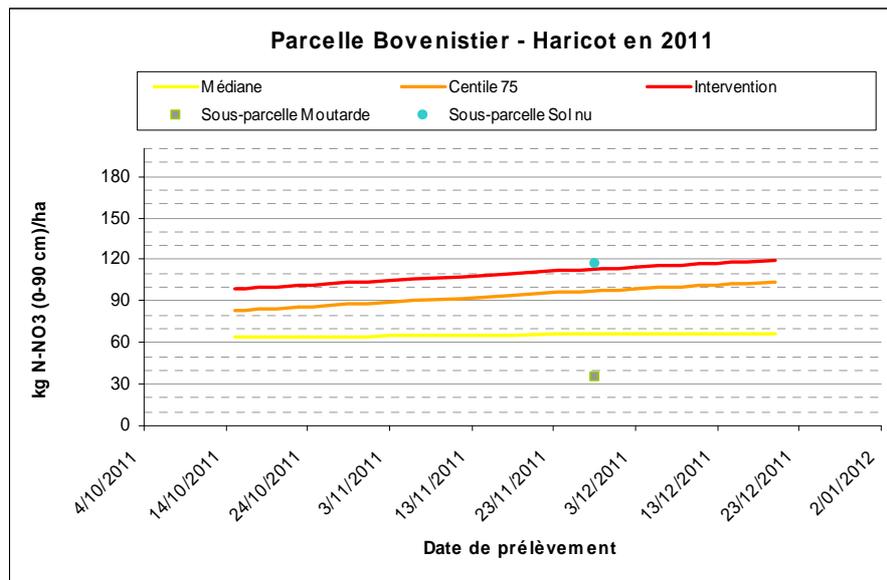


Figure 13. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier et APL de référence 2011 en légumes

En conclusion, sur cette parcelle emblavée en haricot et contrairement aux essais précédents, la réduction de fertilisation n'a pas induit de baisse de rendement. Suite à un accident cultural, le haricot n'a pas pu exprimer son potentiel de rendement. Le semis d'une moutarde après la récolte a été une mesure efficace pour réduire l'APL.

6.2.3 2012 : betterave

Les betteraves ont été plantées le 24 mars. Plusieurs essais concordants ayant déjà été menés en betterave depuis le début de ce projet, il a été décidé de ne pas mener d'essai sur cette parcelle en 2012.

Un prélèvement de sol a été réalisé sur le parcellaire expérimental de cette parcelle le 6 mars, avant la plantation des betteraves (Tableau 20). Pour rappel, l'itinéraire technique sur les deux objets de l'essai en 2011 étaient un haricot sans apport d'azote suivi d'une moutarde d'une part et un haricot avec apport de 37 UN sans couverture de sol à l'automne d'autre part. On peut voir que la différence de reliquat azoté en sortie d'hiver est faible (10 kg N-NO₃⁻/ha) et n'est pas considérée comme significative par l'analyse statistique. On observe par contre que l'azote nitrique est plutôt localisé dans la couche 60-90cm après sol nu alors qu'il est plutôt localisé dans la couche 0-30cm après moutarde. La moutarde semée après haricot a donc été efficace pour piéger le nitrate en période de lixiviation et le restituer à une profondeur où il pourra être prélevé rapidement par les betteraves. Le profil observé après sol nu est indicateur d'un risque plus élevé de lixiviation du nitrate.

Tableau 20. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Gros Thier Bovenistier (betterave) - 2012

	6/3/2012	
	Après moutarde et 0 UN sur haricot en 2011	Après sol nu et 37 UN sur haricot en 2011
0-30cm	29	23
30-60cm	27	28
60-90cm	18	33
total	74	84
Gr. statistique	a	

Sur l'ensemble de la parcelle (y compris le parcellaire expérimental), l'agriculteur a appliqué 90 UN le 20 mars. Les betteraves ont été arrachées le 8 novembre. Deux prélèvements de sol ont été réalisés sur l'ensemble de la parcelle le 26 octobre et le 7 décembre en vue d'y mesurer l'APL (Tableau 21). Les APL sont faibles et conformes aux valeurs attendues après betterave. Ils sont d'ailleurs qualifiés de bons aux deux dates.

Tableau 21. APL (kg N-NO₃/ha) sur la parcelle Gros Thier Bovenistier (betterave) - 2012

	26/10/2012	7/12/2012
	Sur l'ensemble de la parcelle	
0-30cm	5	8
30-60cm	4	6
60-90cm	2	4
total	11	18

6.2.4 2013 : carotte

En 2013, une carotte est implantée sur cette parcelle. Aucune expérimentation n'a été menée.

6.2.5 Analyse des percolats

La saison de drainage 2010 – 2011 s'est étalée de septembre 2010 à avril 2011 (Tableau 22). 38% de la pluviométrie a été récoltée à l'exutoire du lysimètre durant cette saison de drainage. Ce pourcentage est plus élevé que ceux observés les années précédentes (de 10 à 30%). Les fortes pluies de novembre 2010 ainsi que la fonte des neiges de décembre peuvent expliquer ceci. Au cours de cette période, les teneurs en nitrate dans l'eau récoltée ont sensiblement augmenté, de 50 mg NO₃⁻/l en septembre 2010 à 120 mg NO₃⁻/l en mars 2011. L'équivalent de 38 kg N-NO₃⁻/ha ont été lixiviés entre septembre 2010 et août 2011. L'impact des cultures de fève des marais et d'épinard en 2009 et de poireau en 2010 s'est donc fait ressentir sur la qualité de l'eau de percolation durant cette période.

La saison de drainage 2011 – 2012 s'est amorcée tardivement, en janvier 2012, suite à la sécheresse automnale, et s'est poursuivie jusqu'au mois d'avril. La percolation a ensuite repris au cours des mois de juin et juillet suite aux pluies de cette période. 91,5l ont été récoltés dans la chambre de visite lors de cette saison de drainage, représentant 15% de la pluviométrie. Ce pourcentage est comparable à ceux observés les années précédentes. Au cours de cette période, les teneurs en nitrate dans l'eau de percolation étaient élevées (146 mg NO₃⁻/l en moyenne), suite à une culture de haricot pourtant suivie d'une moutarde. L'équivalent de 30 kg N-NO₃⁻/ha ont été lixiviés entre janvier et juillet 2012.

La saison de drainage 2012 – 2013 a repris brièvement durant le mois de novembre 2012, avec de faibles volumes récoltés (0,8l), suite au mois d'octobre pluvieux. La percolation a ensuite repris tardivement, au mois de février 2013, pour s'arrêter au mois de mai. 10l ont encore été récoltés à l'exutoire de ce lysimètre au mois de juin suite aux pluies abondantes de mai. Au final, un volume relativement faible (38l, représentant 8% de la pluviométrie totale) a été récolté à l'exutoire de ce lysimètre au cours de cette saison de drainage, signe du profil asséché rencontré après la culture de betterave sur cette parcelle en 2012. La concentration en nitrate dans l'échantillon récolté en novembre était du même ordre de grandeur que celle mesurée lors de la saison de drainage précédente (144 mg NO₃⁻/l en moyenne). Par la suite, on observe une baisse importante dans les concentrations en NO₃⁻ des échantillons récoltés à partir du mois de février 2013. Les concentrations avoisinaient alors régulièrement 1 à 2 mg NO₃⁻/l. Les faibles APL mesurés à l'aplomb du lysimètre en 2011 (haricot + moutarde) et surtout en 2012 (betterave) expliquent ces faibles concentrations.

Tableau 22 : Parcelle Gros Thier Bovenistier, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie	Irrigation	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(mm)	(l)	(mg NO ₃ -/l)	(kg N-NO ₃ /ha)
Septembre 2010	48	-	3,4	50	0,4
Octobre	43	-	1,6	55	0,2
Novembre	86	-	64,3	68	9,8
Décembre	24	-	38,5	68	5,9
Janvier 2011	58	-	74,3	97	16,3
Février	23	-	17,3	102	4,0
Mars	13	-	6,3	120	1,7
Avril	16	-	0,2	127	0,1
Mai	0	-	0	-	-
Juin	44	15	0	-	-
Juillet	63	-	0,1	109	0,0
Août	110	-	0,3	115	0,1
DRAINAGE 2010-2011	528	15	206,2	83	38,4
Septembre	18	-	0	-	-
Octobre	25	-	0	-	-
Novembre	3	-	0	-	-
Décembre	121	-	0	-	-
Janvier 2012	69	-	38	136	11,7
Février	23	-	21,9	156	7,7
Mars	10	-	18	153	6,2
Avril	45	-	1,2	168	0,4
Mai	71	-	0	-	-
Juin	87	-	8,5	148	2,8
Juillet	116	-	3,9	151	1,3
Août	25	-	0	-	-
DRAINAGE 2011-2012	613	0	91,5	146	30,1
Septembre	27	-	0	-	-
Octobre	102	-	0	-	-
Novembre	25	-	0,8	144	0,3
Décembre	91	-	0	-	-
Janvier 2013	38	-	0	-	-
Février	29	-	13,2	28	0,8
Mars	18	-	7,7	2	0
Avril	20	-	6,3	0	0
Mai	84	-	0	-	-
Juin	42	-	10,1	4	0,1
DRAINAGE 2012-2013	476	0	38,0	14	1,2

6.2.6 Synthèse

La Figure 14 synthétise les mesures et observations pour la parcelle Gros Thier Bovenistier. La première partie du graphique (hivers 2008-2009 et 2009-2010) confirme à nouveau que les teneurs en nitrate sont faibles après une succession betterave – froment - CIPAN. Ensuite, à partir de l'hiver 2010-2011, les concentrations ont augmenté pour se stabiliser autour des 150 mg NO₃⁻/l tout au long de l'année 2012. Il faut certainement y voir l'effet de l'implantation, à partir de 2009, de trois (doubles) cultures légumières laissant des reliquats azotés importants dans le sol (cf. reliquats azotés entre 200 et 300 kg N/ha en juin et septembre 2010 au repiquage des poireaux, après que la terre soit restée nue durant 9 mois suite à une double culture de fève des marais et d'épinard d'automne).

En 2011, le raisonnement de la fertilisation azotée et le semis d'une moutarde après la culture de haricot ont permis de limiter l'APL de novembre à une valeur assez faible pour ce type de culture. Cependant, les concentrations mesurées dans l'eau de percolation en 2012 ne diminuent pas et demeurent élevées (~150 mg NO₃⁻/l). Comme sur la parcelle Grosse Pierre Chemin de Fer (cf §6.1.6), le semis d'une moutarde après une culture laissant des APL élevés comme le haricot n'a permis de limiter que partiellement le risque de pollution par le nitrate des eaux de percolation, les concentrations restant élevées en valeur absolue.

A nouveau, sur cette parcelle où se sont succédées trois cultures (ou doubles cultures) pouvant laisser des APL élevés, et où les conseils de fertilisation ont été respectés (voire diminués – 100 UN ont été apportées à l'aplomb du lysimètre en trois ans), il apparaît qu'une modification des modes de gestion de l'interculture et des successions culturales est nécessaire pour réduire les pertes de nitrate vers les eaux souterraines.

Suite à la culture de betterave sur cette parcelle en 2012 et aux faibles APL mesurés à l'automne (11 et 18 kg N-NO₃⁻/ha), les concentrations des échantillons d'eau récoltée dans ce lysimètre ont diminué drastiquement et étaient particulièrement faibles au cours des six premiers mois de l'année 2013 (<5 mg NO₃⁻/l).

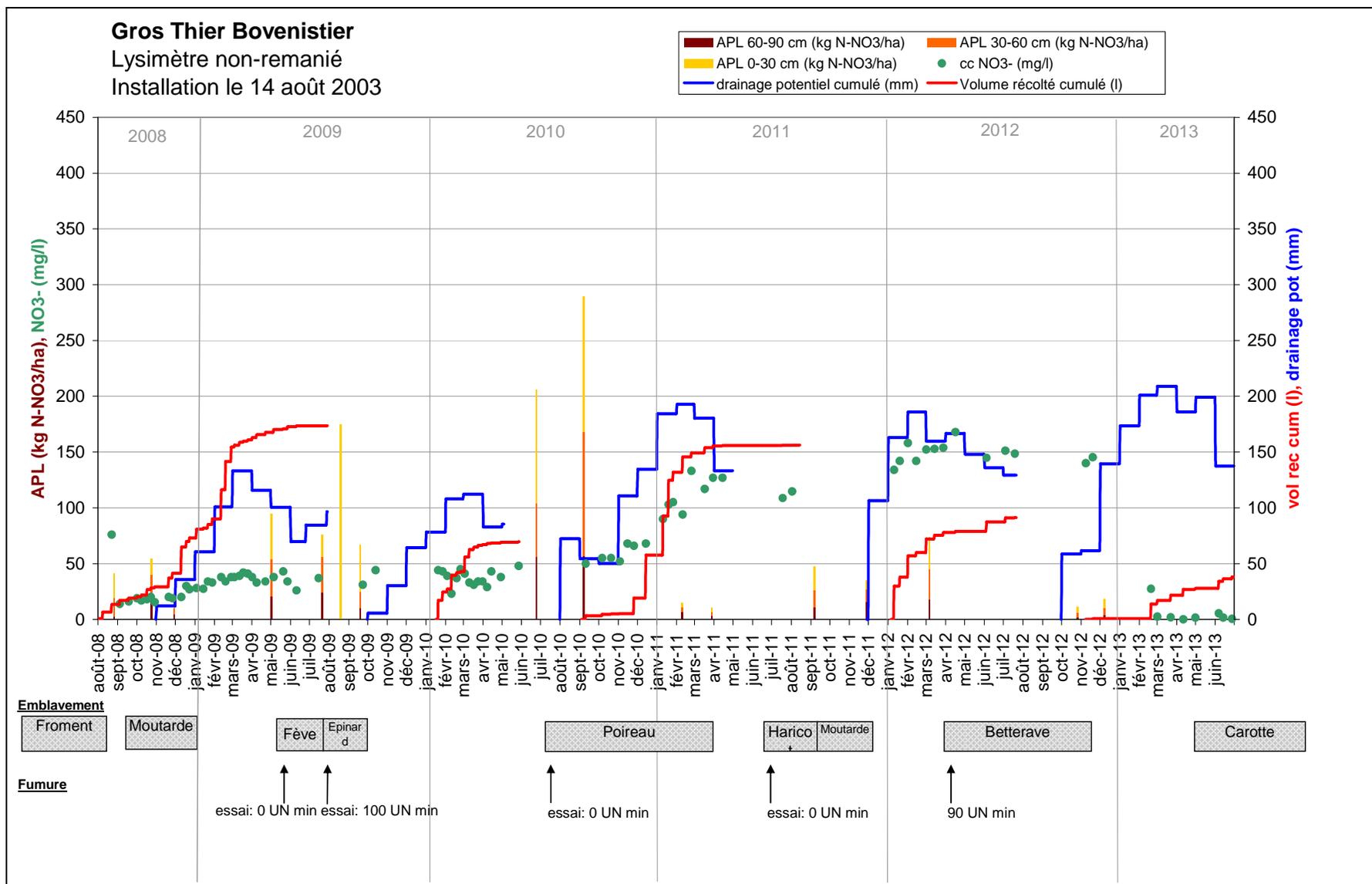


Figure 14. Synthèse des mesures et observations, parcelle Gros Thier Bovenistier

6.3 PL1

Ce lysimètre a été le premier installé, le 17 avril 2003. Il est de type non-remanié.

L'historique cultural récent de cette parcelle est le suivant :

2008 : froment suivi de phacélie
 2009 : fève des marais suivie d'épinard d'automne
 2010 : betterave
 2011 : froment
 2012 : carotte
 2013 : froment

Le bord supérieur de ce lysimètre capte la nappe ou sa frange capillaire lors de la remontée de nappe en hiver, comme l'a confirmé le réseau de piézomètres installé en février 2004. Afin d'obtenir des mesures reflétant au mieux la quantité réelle de nitrate qui migre sous les 2m de profondeur, l'exutoire du lysimètre est fermé à l'aide d'une vanne dès que les piézomètres indiquent une remontée de la nappe telle que la frange capillaire est captée.

6.3.1 2010 : betterave

Le semis des betteraves a été effectué le 14 avril. Les sous-parcelles sont de dimension 5x8m et sont séparées par des chemins d'une largeur de 1m (Figure 3).

Des profils azotés ont été établis sur les sous-parcelles de l'essai et sur l'ensemble de la parcelle avant et après la culture de betterave (Tableau 23 et Tableau 24).

Tableau 23. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 (betterave) - 2010

	15/4/2010		8/11/2010	
	0 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	61 UN à appliquer sur 4 sous-parcelles	0 UN appliquées sur 5 sous-parcelles	61 UN appliquées sur 4 sous-parcelles
0-30cm	46	51	11	12
30-60cm	38	43	7	6
60-90cm	31	34	4	4
total	115	128	22	22
	Gr. Statistique		a	

Tableau 24. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur la parcelle PL1 (à l'exception de l'essai) (betterave) - 2010

	10/3/2010	30/11/2010
	47 UN à appliquer sur la parcelle (sauf l'essai)	47 UN appliquées sur la parcelle (sauf l'essai)
0-30cm	35	3
30-60cm	49	5
60-90cm	32	4
total	116	12

La quantité d'azote nitrique présent dans le sol jusque 90cm de profondeur en avril 2010 (Tableau 23) est assez importante. On peut y voir l'effet de la minéralisation des résidus de fève des marais et d'épinard cultivés en 2009 sur cette parcelle. La quantité d'azote nitrique

présente dans le sol reste stable entre le mois de mars (prélèvement sur l'ensemble de la parcelle) et le mois d'avril (prélèvement sur le parcellaire expérimental).

Compte tenu de ces profils azotés, un scénario 0 UN a été testé sur les sous-parcelles P1, P3, P6, P8 (Figure 3) ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre. 61 UN minéral ont été appliquées sur les sous-parcelles P2, P4, P5, P7 le 23 avril. L'agriculteur a appliqué 47 UN sur l'ensemble de sa parcelle, à l'exception de l'essai.

Les betteraves ont été arrachées le 28 octobre.

Les profils azotés établis le 8 novembre (Tableau 23) sont peu chargés en azote nitrique, surtout dans les couches intermédiaire et profonde, soulignant là une bonne utilisation de l'azote par la betterave au cours de son cycle de culture. On n'observe pas de différence entre les reliquats azotés post-récolte mesurés sur les sous-parcelles de l'essai en betterave en 2010.

Le profil azoté établi fin novembre (Tableau 24) dans l'ensemble de la parcelle, à l'extérieur de l'essai, est également très peu chargé en azote nitrique, soulignant la bonne gestion de la fertilisation par l'agriculteur et l'intérêt de la culture de betterave (avec une fertilisation raisonnée) pour la préservation de la qualité de l'eau qui percole en profondeur. L'APL obtenu sur la parcelle est qualifiée de « bon » par rapport à l'APL de référence de 2010 en betterave (classe A1 – Figure 15) ; les APL obtenus sur l'essai sont également qualifiés de « bons » pour les deux objets testés.

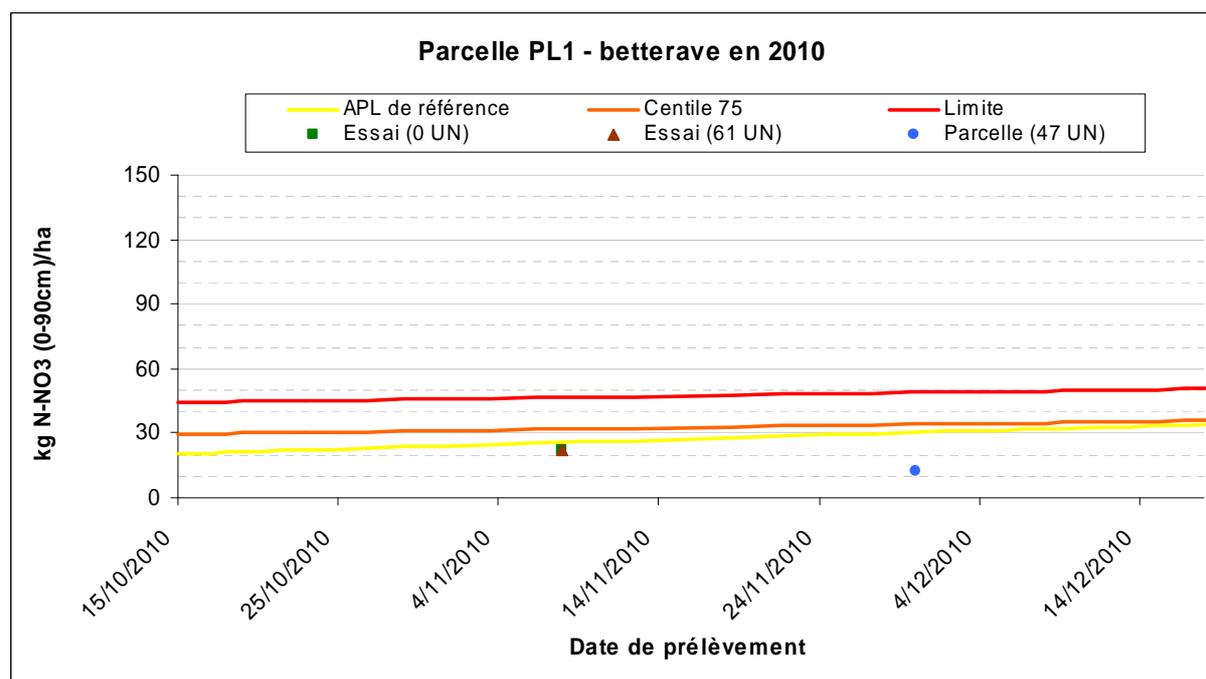


Figure 15. Résultats APL de la parcelle PL1 par rapport à l'APL de référence 2010 (betterave – classe A1)

Les rendements « matière fraîche » ainsi que les rendements « sucre » ont été mesurés individuellement sur les différentes sous-parcelles de l'essai. Les moyennes de ces rendements sont présentées dans le Tableau 25.

Tableau 25. Rendement total et rendement sucre obtenus sur l'essai de la parcelle PL1 (betterave) – 2010

Fumure appliquée (kg N/ha)	0 UN	61 UN
Rendement « matière fraîche » (t/ha)	103,7	98,9
	a	
Richesse (%)	18,0	17,9
Rendement « sucre » (t/ha)	18,7	17,7
	a	

L'absence de fertilisation azotée n'induit pas de baisse de rendement. Au contraire, les rendements sucre obtenus sur les sous-parcelles sans apport d'azote sont supérieurs d'1 t/ha en moyenne à ceux obtenus sur les sous-parcelles qui ont reçu 61 UN ; cette différence n'est cependant pas considérée comme significative par l'analyse statistique.

A titre de comparaison, le rendement « matière fraîche » moyen obtenu sur la parcelle s'élève à 87 t/ha et le rendement « sucre » moyen s'élève à 15,7 t/ha. Il est cependant difficile de comparer les rendements obtenus par l'arrachage mécanique des betteraves sur l'ensemble de la parcelle aux rendements obtenus par l'arrachage manuel des betteraves sur le parcellaire expérimental. En outre, une partie de la parcelle a été arrachée plus tôt dans la saison ce qui accentue encore cette différence.

En conclusion, sur cette parcelle et dans les conditions (culturales, climatiques,...) de 2010, la diminution du conseil de 61 kg N/ha sur 4 sous-parcelles de l'essai en betterave n'a engendré ni perte de rendement ni diminution d'APL ; l'apport de 61 kg N/ha s'est donc révélé inutile à posteriori.

6.3.2 2011 : froment + CIPAN

La méthode de calcul du conseil de fertilisation en froment étant relativement bien maîtrisée (cf. Livre Blanc), l'essai sur cette parcelle en 2011 a porté sur la gestion de l'interculture.

Le froment a été semé le 1^{er} novembre 2010. L'agriculteur a appliqué 193 UN sur l'ensemble de sa parcelle (y compris le parcellaire expérimental). Un profil azoté a été établi le 1^{er} septembre, après la moisson du froment, autour de l'essai (Tableau 27).

Le 31 août, un mélange de trèfle d'Alexandrie et d'avoine brésilienne a été semé sur les sous-parcelles P1, P3, P6 et P8 (ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre) (Figure 3) et un trèfle d'Alexandrie a été semé sur les sous-parcelles P2, P4, P5 et P7.

Le 17 novembre, deux profils azotés (correspondant aux deux couverts testés) ont été établis avant enfouissement des CIPAN sur le parcellaire expérimental (Tableau 26). On peut voir que les APL mesurés étaient relativement faibles. Le trèfle d'Alexandrie pur a laissé un APL supérieur de 15kg N-NO₃⁻/ha à celui du mélange trèfle – avoine ; cette différence n'est cependant pas considérée comme significative par l'analyse statistique.

Le reste de la parcelle n'a pas été couvert par une CIPAN. L'APL y est logiquement plus élevé que sur le parcellaire expérimental. On peut donc voir que par rapport au reste de la parcelle (sol nu), le mélange trèfle d'Alexandrie – avoine brésilienne a prélevé 56 kg N-NO₃⁻/ha tandis que le trèfle d'Alexandrie seul a prélevé 41 kg N-NO₃⁻/ha. Le mélange avoine – trèfle (ainsi que le trèfle pur dans une moindre mesure) s'est donc révélé être un couvert

efficace pour prélever le nitrate. Cette bonne capacité de piégeage du nitrate d'un couvert d'avoine en association avec une légumineuse avait déjà été mise en évidence par De Toffoli et al (2010).

Tableau 26. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de PL1 (froment + CIPAN) – 2011

	01/09/2011	17/11/2011		27/11/2011
	Autour de l'essai	Parcellaire expérimental		Parcelle entière (sauf essai)
	Après la moisson et avant CIPAN	Trèfle d'Alexandrie + avoine brésilienne	Trèfle d'Alexandrie	Sol nu
0-30cm	25	9	15	27
30-60cm	22	11	18	42
60-90cm	10	5	7	12
total	57	25	40	81
	Gr. Statistique	a		

Les APL mesurés sur le parcellaire expérimental ont été comparés à l'APL de référence de 2011 en céréales avec CIPAN (classe A2 – Figure 16). Le semis d'un trèfle d'Alexandrie a permis d'obtenir un APL qualifié de limite tandis que le semis d'un mélange trèfle d'Alexandrie – avoine brésilienne a permis d'obtenir un APL qualifié de satisfaisant.

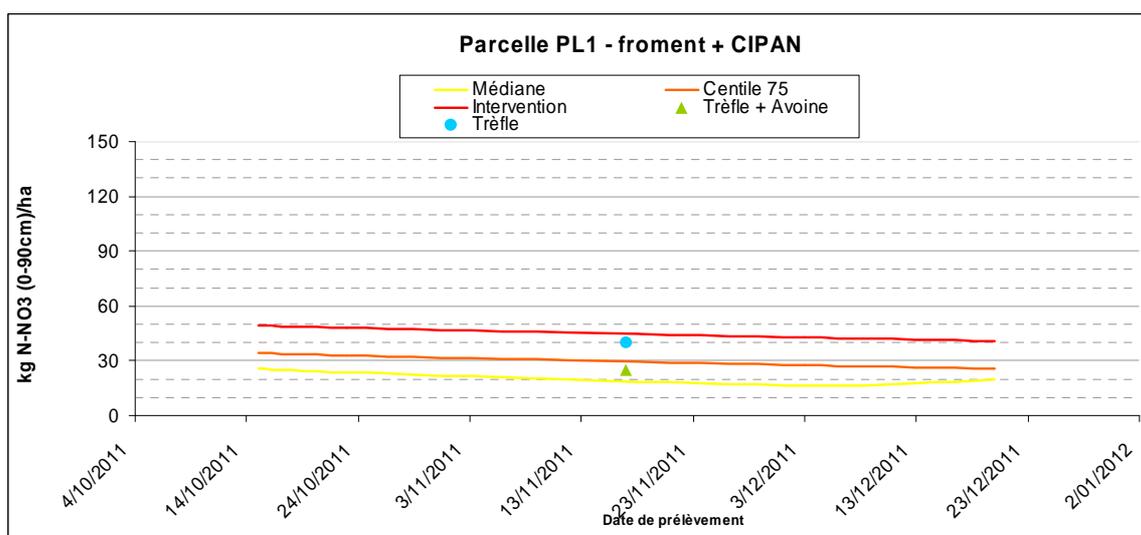


Figure 16. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 et APL de référence 2011 en céréales avec CIPAN

En conclusion, sur cette parcelle, on n'a pas observé de différence significative d'APL en fonction du couvert après froment (mélange trèfle – avoine ou trèfle pur). Par contre, ces couverts se sont révélés efficaces pour diminuer sensiblement l'APL par rapport au reste de la parcelle qui n'a pas été couvert en automne.

6.3.3 2012 : carotte

En 2011, deux couverts avaient été testés sur le parcellaire expérimental après froment : un trèfle d'Alexandrie et un mélange de trèfle d'Alexandrie et d'avoine brésilienne (cf. §6.3.2).

En 2012, un prélèvement de sol a été réalisé sur les deux objets du parcellaire expérimental le 6 mars pour mesurer le reliquat azoté en sortie d'hiver (Tableau 27). La partie de l'essai semée en trèfle d'Alexandrie uniquement présente un reliquat en sortie d'hiver supérieur (+ 35 kg N-NO₃⁻/ha) à celui mesuré sur la partie semée avec un mélange de trèfle d'Alexandrie et d'avoine brésilienne. Cette différence n'est pas significative d'un point de vue statistique. Les conseils de fumure établis pour ces deux objets étant le « zéro azote », il a été décidé de ne pas mener d'essai de fertilisation sur cette parcelle en 2012.

Les carottes ont été semées le 30 avril et 27 UN ont été appliquées par l'agriculteur sur l'ensemble de la parcelle (excepté le parcellaire expérimental). Les carottes ont été récoltées le 15 novembre.

Un second prélèvement de sol a été réalisé le 20 novembre, après récolte des carottes (Tableau 27). La quantité d'azote nitrique présente dans le sol à cette période est faible et la différence d'APL entre les deux parties du parcellaire n'est pas significative. A titre comparatif, l'APL mesuré sur l'ensemble de la parcelle s'élève à 8 kg N-NO₃⁻/ha.

Tableau 27. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 (carotte) – 2012

	6/3/2012		20/11/2012		6/12/2012
	Parcellaire expérimental		Parcellaire expérimental – 0 UN appliquées		Parcelle entière (sauf essai) – 27 UN appliquées
	Après trèfle d'Alexandrie + avoine brésilienne en 2011	Après trèfle d'Alexandrie en 2011	Post-récolte carotte après trèfle + avoine en 2011	Post-récolte carotte après trèfle en 2011	Après carotte
0-30cm	20	36	5	4	3
30-60cm	22	34	3	2	2
60-90cm	18	25	2	1	3
total	60	95	10	7	8
Gr. Stat.	a		a		

Les APL mesurés sur le parcellaire expérimental ont été comparés à l'APL de référence de 2012 en légumes (classe A7 - Figure 17). Les APL sont bons sur les deux parties du parcellaire expérimental.

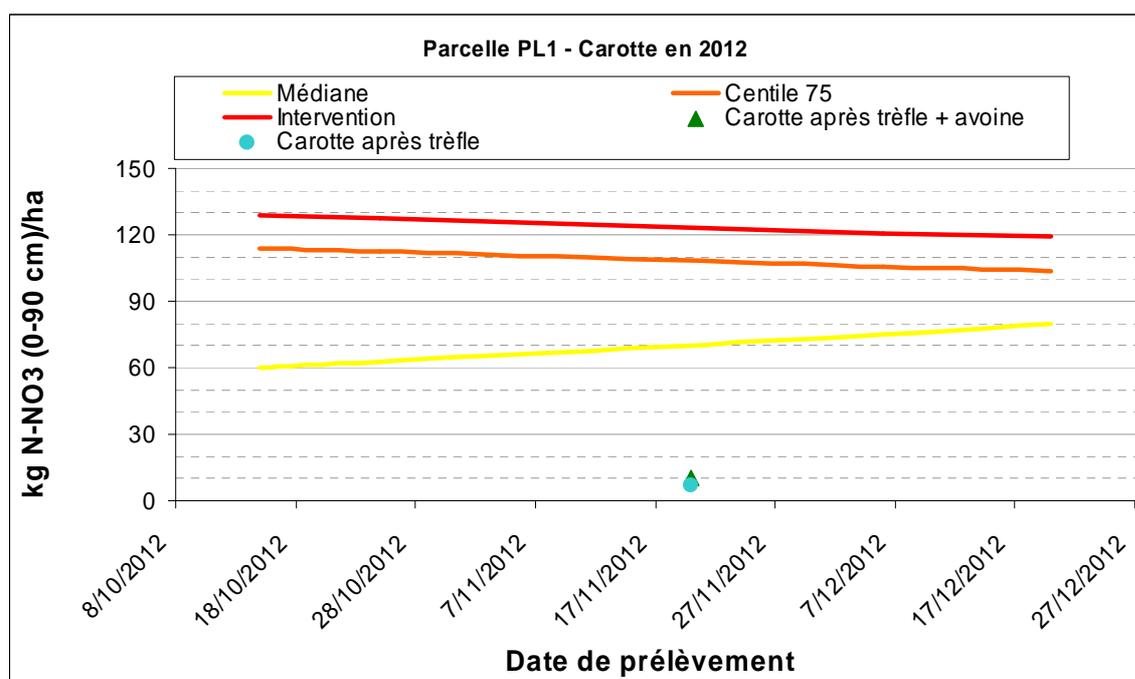


Figure 17. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL1 et APL de référence 2012 en légumes

En conclusion, sur cette parcelle, les couverts implantés en automne 2011 (trèfle d’Alexandrie et mélange trèfle d’Alexandrie – avoine brésilienne) s’étaient révélés efficaces pour diminuer l’APL par rapport au reste de la parcelle qui n’avait pas été couvert en automne. La différence non significative de reliquat azoté en sortie d’hiver (35 kg N-NO₃⁻/ha) entre les deux couverts testés n’a pas induit de différence dans les conseils de fertilisation en carotte en 2012. Le « zéro azote » étant conseillé, l’effet du couvert testé en 2011 n’a donc pu être mis en évidence sur carotte.

6.3.4 2013 : froment

Un froment a été semé sur cette parcelle le 20 novembre. Aucune expérimentation n’a été menée.

6.3.5 Analyse des percolats

Au cours de la saison de drainage 2010-2011 (Tableau 28), la percolation a repris en octobre 2010. La mesure du niveau d'eau dans les piézomètres en novembre 2010 couplée au débordement des bidons dans la chambre de visite indiquaient que le bord supérieur du lysimètre captait la nappe ou sa frange capillaire et il a dès lors été décidé de fermer la vanne à l'exutoire du lysimètre jusqu'avril 2011. Lors de la période de fermeture de ce lysimètre, des échantillons d'eau ont malgré tout été récoltés après ouverture de la vanne pendant un court laps de temps (une à deux heures) ; ceci permet d'avoir une vue de la qualité de l'eau en phase de percolation et de l'eau de nappe (ou sa frange capillaire) captée par le lysimètre. Les teneurs en nitrate de l'eau récoltée lors de ces courtes ouvertures de la vanne lysimétrique fin 2010 et début 2011 étaient assez faibles ($<30 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$). Après réouverture de la vanne en avril, les concentrations dans l'eau de percolation restaient très faibles.

Au cours de la saison de drainage 2011-2012, la percolation a repris en janvier 2012 dans ce lysimètre. Le débordement des bidons dans la chambre de visite indiquait cependant que le bord supérieur du lysimètre captait la nappe ou sa frange capillaire et il a dès lors été décidé de fermer la vanne à l'exutoire du lysimètre jusqu'avril 2012. Le lysimètre a également été fermé durant le mois de juin 2012. Les teneurs en nitrate de l'eau récoltée lors des courtes périodes d'ouverture de la vanne lysimétrique durant les premiers mois de l'année 2012 s'élevaient entre 50 et 90 $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$. Après réouverture de la vanne en juillet, les concentrations dans l'eau de percolation ont augmenté (~ 110 à $125 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$).

A la reprise de la percolation en septembre 2012, les concentrations en nitrate dans l'eau de percolation étaient à la baisse, entre 60 et 70 $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$. Le débordement des bidons de récolte et la mesure de la profondeur de nappe dans les piézomètres ont conduit à fermer la vanne à l'exutoire de ce lysimètre à partir du mois de novembre 2012 jusqu'au mois de mai 2013. Les concentrations des échantillons récoltés durant la première moitié de l'année 2013 (lors des courtes périodes d'ouverture de la vanne) étaient en baisse, avec des valeurs très faibles ($<10 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$) à partir du mois de février. Les volumes récoltés à l'exutoire de ce lysimètre lors de la réouverture de la vanne au mois de mai 2013 étaient importants, conséquence du mois de mai particulièrement humide.

Tableau 28 : Parcelle PL1, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie	Irrigation	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(mm)	(l)	(mg NO ₃ /l)	(kg N-NO ₃ /ha)
Septembre 2010	48	-	0	-	-
Octobre	43	-	0,4	65	0,1
Novembre	86	-	0,2	33	0
Décembre	24	-	fermé	(27)	-
Janvier 2011	58	-	fermé	(27)	-
Février	23	-	fermé	(27)	-
Mars	13	-	fermé	(21)	-
Avril	16	-	42,1	12	1,2
Mai	0	-	2,7	1	0,0
Juin	44	-	0,6	5	0,0
Juillet	63	-	0,2	20	0,0
Août	110	-	0,1	35	0,0
DRAINAGE 2010-2011	528	0	46,3	12	1,25
Septembre	18	-	0	-	-
Octobre	25	-	0	-	-
Novembre	3	-	0	-	-
Décembre	121	-	0	-	-
Janvier 2012	69	-	fermé	(93)	-
Février	23	-	fermé	(88)	-
Mars	10	-	fermé	(78)	-
Avril	45	-	fermé	(83)	-
Mai	71	-	5,8	76	1
Juin	87	-	fermé	(45)	-
Juillet	116	-	29,4	126	8,4
Août	25	-	4,3	108	1
DRAINAGE 2011-2012	613	0	39,5	117	10,4
Septembre	27	20	4,9	105	1,2
Octobre	102	-	17,2	66	2,5
Novembre	25	-	fermé	(71)	-
Décembre	91	-	fermé	(58)	-
Janvier 2013	38	-	fermé	(32)	-
Février	29	-	fermé	(8)	-
Mars	18	-	fermé	(1)	-
Avril	20	-	fermé	(2)	-
Mai	84	-	38,6	2	0,2
Juin	42	-	75,5	15	2,5
DRAINAGE 2012-2013	476	20	136,1	20	6,2

6.3.6 Synthèse

La Figure 18 résume les mesures et observations pour la parcelle PL1. Ce lysimètre est régulièrement fermé (à l'aide d'une vanne située à son exutoire) durant la période automnale et hivernale au cours de laquelle le lysimètre intercepte la nappe ou sa frange capillaire. La récolte de volumes d'eau très importants, couplée aux mesures du niveau d'eau dans les piézomètres situés à proximité, permettent de préciser quand le lysimètre entre en phase de drainage de la nappe, nécessitant alors la fermeture de la vanne. La durée de la période de fermeture hivernale du lysimètre est variable et dépend des conditions climatiques et culturales.

Lors de l'hiver 2010 – 2011, la vanne a été fermée à la mi-novembre 2010 et a été rouverte à la mi-avril 2011. Au cours de l'hiver suivant, la vanne à l'exutoire de ce lysimètre est restée fermée de janvier 2012 à début avril 2012. Ensuite, la vanne a de nouveau été fermée dans le courant du mois de juin 2012 pour être rouverte au début du mois de juillet. Enfin, la vanne est restée fermée depuis le début du mois de novembre 2012 suite au débordement des bidons de récolte jusque fin avril 2013. Lors de la période de fermeture du lysimètre, des échantillons d'eau ont malgré tout été récoltés après ouverture de la vanne pendant un court laps de temps (une à deux heures) ; ceci permet d'avoir une vue de la qualité de l'eau en phase de percolation et de l'eau de nappe (ou sa frange capillaire) captée par le lysimètre.

Globalement, les teneurs en nitrate mesurées dans l'eau de percolation de ce lysimètre étaient faibles ($< 40 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$) depuis plusieurs années (2009 – 2010 – 2011), suite à des cultures de betterave et de froment avec CIPAN correctement gérée au niveau de la fertilisation. L'introduction d'une succession fève des marais – épinard d'automne en 2009 n'avait pas provoqué d'augmentation des teneurs en NO_3^- à l'exutoire du lysimètre car l'agriculteur avait laissé repousser l'épinard qui avait pu jouer son rôle de CIPAN jusqu'au labour d'hiver.

Cependant, les teneurs en nitrate mesurée dans l'eau récoltée dans ce lysimètre en 2012 étaient étonnamment en augmentation. En effet, dès le début de l'année, les échantillons récoltés durant les courtes phases d'ouverture de la vanne du lysimètre présentaient des teneurs en nitrate en augmentation, de l'ordre de $80 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$, suite pourtant à une succession betterave – froment – CIPAN avec une fertilisation raisonnée (voire nulle) et présentant des APL tout à fait raisonnables les années précédentes. Un pic de concentration au-delà de $100 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ a même été observé durant les mois de juillet et août. Cette augmentation des teneurs en nitrate dans l'eau récoltée dans ce lysimètre en 2012 est donc difficilement explicable. Une hypothèse pourrait être l'introduction d'une légumineuse en mélange dans le couvert hivernal. Rappelons également que le reliquat azoté n'est jamais mesuré au droit du lysimètre. Il est donc également possible qu'un phénomène très ponctuel ait donné lieu à un reliquat élevé à cet endroit.

Depuis la reprise de la percolation au mois de novembre 2012, les concentrations ont fortement diminué et sont restées sous les $20 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ dès le mois de février 2013. Ces concentrations sont conformes aux valeurs attendues compte tenu des faibles APL observés sur cette parcelle depuis trois ans, suite à des cultures de betterave, de froment suivi d'une CIPAN et de carotte.

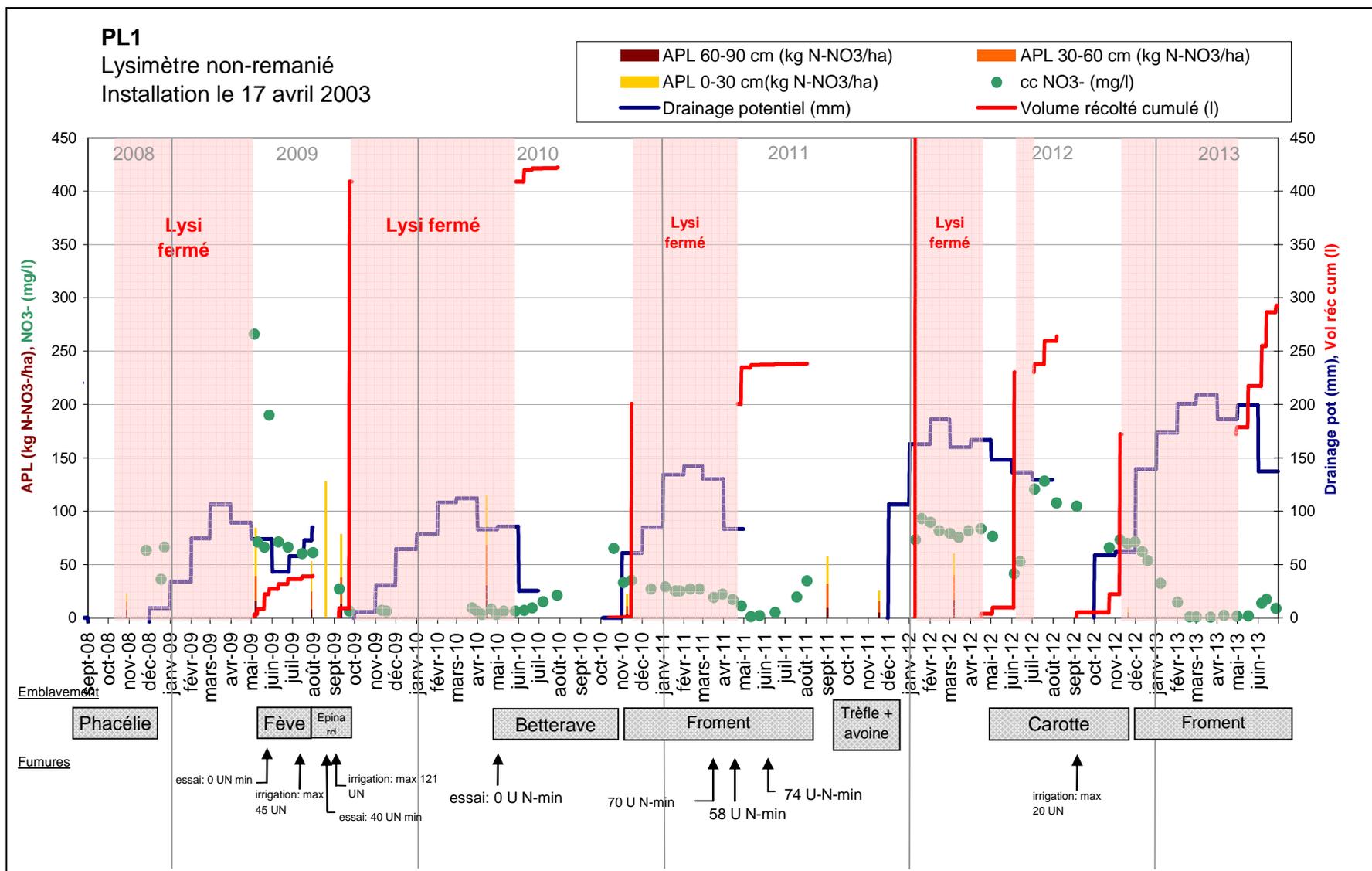


Figure 18. Synthèse des mesures et observations, parcelle PL1

6.4 PL3

Ce lysimètre est de type non remanié, installé en date du 8 août 2003.

L'historique cultural récent de cette parcelle est le suivant :

2008 : betterave
 2009 : froment suivi de phacélie
 2010 : fève des marais suivie d'épinard d'automne
 2011 : froment suivie de phacélie
 2012 : haricot
 2013 : froment

Comme pour le lysimètre installé sur la parcelle PL1, le bord supérieur de ce lysimètre capte la nappe ou sa frange capillaire lors de la remontée de nappe en hiver, comme l'a confirmé le réseau de piézomètres installé en février 2004. Afin d'obtenir des mesures reflétant au mieux la quantité réelle de nitrate qui migre sous les 2m de profondeur, l'exutoire du lysimètre est fermé à l'aide d'une vanne dès que les piézomètres indiquent une remontée de la nappe telle que la frange capillaire est captée.

6.4.1 2010 : fève des marais

Le semis des fèves des marais a été effectué le 16 avril. Les sous-parcelles sont de dimension 5x8m et sont séparées par des chemins d'une largeur de 1m (Figure 3).

Le profil azoté en vue du conseil de fumure a été établi sur les sous-parcelles de l'essai le 20 avril (Tableau 29).

Tableau 29. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur le parcellaire expérimental de PL3 (fève des marais) - 2010

	20/4/2010		16/7/2010	
	0 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	26 UN à appliquer sur 4 sous-parcelles	0 UN appliquées sur 5 sous-parcelles	26 UN appliquées sur 4 sous-parcelles
0-30cm	27	23	29	36
30-60cm	13	13	14	15
60-90cm	7	7	7	8
total	47	43	50	59
		Gr. statistique	a	

Compte tenu de ces profils azotés, un scénario 0 UN a été testé sur les sous-parcelles P1, P3, P6, P8 (Figure 3) ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre. 26 UN minéral ont été appliquées sur les sous-parcelles P2, P4, P5, P7 le 23 avril. Pour rappel, ce conseil tient compte des recommandations de la convention précédente, à savoir des besoins forfaitaires de 70 kg N/ha pour la fève des marais. A titre de comparaison, l'agriculteur a appliqué 39 UN sur l'ensemble de sa parcelle, à l'exception de l'essai. Les fèves des marais ont été irriguées à l'eau usée de l'usine Hesbayefrost, pour un total de 69 mm (cf. §5).

Les fèves des marais ont été récoltées le 13 juillet.

Le reliquat azoté post-récolte mesuré après fève le 16 juillet (Tableau 29) est un peu plus élevé (+ 9 kg N-NO₃⁻/ha) dans les sous-parcelles « 26 UN » que dans les sous-parcelles « 0

UN », le surplus étant surtout localisé en surface (0 – 30 cm). L'analyse statistique révèle cependant que cette différence n'est pas significative.

Pour chaque sous-parcelle, le rendement et la tendérométrie ont été quantifiés individuellement et sont repris dans le Tableau 30.

Tableau 30. Rendements et tendérométrie obtenus sur l'essai de la parcelle PL3 (fève des marais) - 2010

Fumure appliquée (kg N/ha)	0 UN	26 UN
Rendement (kg/ha)	10790	10673
	a	
Tendérométrie	117,0	114,8
	a	

Les rendements obtenus sur l'essai de cette parcelle sont très bons. L'absence de fertilisation azotée minérale n'induit pas de baisse de rendement. L'analyse statistique renseigne que les différences de rendement et de tendérométrie observées entre les deux objets (0 et 26 UN) ne sont pas significatives.

A titre de comparaison, l'agriculteur a obtenu un rendement de 8900 kg/ha sur l'ensemble de sa parcelle.

En conclusion, sur cette parcelle et dans les conditions (culturales, climatiques,...) de 2010, la diminution du conseil de 26 kg N/ha sur 4 sous-parcelles de l'essai en fève des marais n'a engendré ni perte de rendement ni diminution significative d'APL ; l'apport de 26 kg N/ha s'est donc révélé inutile à posteriori.

6.4.2 2010 : épinard d'automne

Les épinards ont été semés le 19 juillet. La quantité d'azote nitrique présente dans les 40 premiers centimètres de sol et disponible pour l'épinard a été mesurée le 3 août afin de déterminer le conseil de fertilisation (Tableau 31).

Tableau 31. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 (épinard d'automne) - 2010

	3/8/2010		6/9/2010		
	70 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	110 UN à appliquer sur 4 sous-parcelles		70 UN appliquées sur 5 sous-parcelles	110 UN appliquées sur 4 sous-parcelles
0-40cm	101	98	0-30cm	34	43
	-	-	30-60cm	72	65
	-	-	60-90cm	31	30
total	101	98	total	137	138
	Gr. Statistique		a		

Le stock d'azote nitrique présent dans les 40 premiers centimètres de sol et disponible pour les épinards le 3 août est important, conséquence de la minéralisation des résidus de la culture de fève et des apports d'azote liés aux irrigations avec les eaux usées de Hesbayefrost. Suite à cette mesure, 70 UN minéral ont été appliquées le 6 août sur les sous-parcelles P1, P3, P6, P8 (Figure 3) ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre, et 110 UN minéral ont été appliquées sur les sous-parcelles P2, P4, P5, P7 à la même date. A titre de comparaison, l'agriculteur a appliqué

67 UN sur l'ensemble de sa parcelle (à l'exception de l'essai). Les épinards d'automne ont été irrigués à l'eau usée de l'usine Hesbayefrost, pour un total de 15 mm (cf. §5).

Les épinards ont été récoltés le 3 septembre et le prélèvement de sol pour mesurer le reliquat azoté post-récolte sur les sous-parcelles a eu lieu le 6 septembre.

On remarque (Tableau 31) que la quantité d'azote nitrique présent dans le sol à la récolte est importante, conséquence de la minéralisation des résidus de culture de fève des marais ; l'azote nitrique est principalement localisé dans la couche 30 – 60 cm, signe que celui-ci est en cours de migration vers les horizons profonds. Par ailleurs, on n'observe pas de différence significative de reliquat azoté post-récolte entre les deux objets testés (70 UN et 110 UN).

Les reliquats azotés post-récolte mesurés dans le parcellaire expérimental ne peuvent pas être comparés à l'APL de référence en légumes étant donné la date de prélèvement de l'échantillon de sol (6 septembre 2010) antérieure au 15 octobre. L'APL mesuré sur l'ensemble de la parcelle (à l'exception du parcellaire expérimental) est satisfaisant en octobre (112 kg N-NO₃⁻/ha) et en novembre (92 kg N-NO₃⁻/ha).

Pour chaque sous-parcelle, le rendement en épinard et le rapport tige/feuille ont été quantifiés individuellement (Tableau 32).

Tableau 32. Rendements et rapports tige-feuille obtenus sur l'essai de la parcelle PL3 (épinard d'automne) - 2010

Fumure appliquée (kg N/ha)	70 UN	110 UN
Rendement (t/ha)	33,2	36,3
	a	
Rapport tige – feuille (%)	18,3	23,2
	a	

Les épinards récoltés sur l'essai étaient bien développés, comme l'attestent les rendements et les rapports tige/feuille élevés. La réduction du conseil de fumure de 40 UN a eu pour conséquence une légère diminution du rendement et du rapport tige/feuille ; cette diminution n'est cependant pas considérée comme significative par l'analyse statistique. Sur le reste de la parcelle, le rendement obtenu était plutôt médiocre (22,3 t/ha) en raison des pluies abondantes du mois d'août qui ont provoqué une asphyxie des épinards.

En conclusion, sur cette parcelle et dans les conditions (culturales, climatiques,...) de 2010, la diminution du conseil de 40 kg N/ha sur 4 sous-parcelles de l'essai en épinard d'automne n'a pas engendré de perte significative de rendement ni de diminution d'APL ; la diminution du conseil de 40 kg N/ha s'est donc révélé utile à posteriori.

6.4.3 2011 : froment + CIPAN

La méthode de calcul du conseil de fertilisation en froment étant relativement bien maîtrisée (cf. Livre Blanc), l'essai sur cette parcelle en 2011 a porté sur la gestion de l'interculture.

Le froment a été semé le 9 octobre 2010. L'agriculteur a appliqué au printemps 2011 132 UN sur l'ensemble de sa parcelle (y compris le parcellaire expérimental). Un profil azoté a été établi le 1^{er} septembre, après la moisson du froment, autour de l'essai (Tableau 33).

Le 31 août, une avoine brésilienne a été semée sur les sous-parcelles P1, P3, P6 et P8 (ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre) (Figure 3) et un mélange avoine brésilienne - vesce a été semé sur les sous-parcelles P2, P4, P5 et P7. Contrairement à l'essai sur la parcelle PL1, le mélange avoine – légumineuse n'a pas été testé à l'aplomb du lysimètre.

Le 17 novembre, deux profils azotés (correspondant aux deux couverts testés) ont été établis sur les CIPAN sur le parcellaire expérimental (Tableau 33). On peut voir que les APL mesurés étaient faibles ($< 20\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}$). Le mélange avoine brésilienne - vesce a laissé un APL supérieur de $4\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}$ à celui de l'avoine brésilienne seule; cette différence est considérée comme significative par l'analyse statistique.

Le reste de la parcelle a été couvert d'une phacélie le 10 septembre. La phacélie s'est bien développée ; on peut d'ailleurs voir que l'APL y était plus faible encore que sur les sous-parcelles de l'essai, sans toutefois pouvoir affirmer que cette différence est statistiquement significative en raison notamment des dates de prélèvement différentes.

Tableau 33. Reliquats azotés ($\text{kg N-NO}_3^-/\text{ha}$) sur le parcellaire expérimental de PL3 (froment + CIPAN) - 2011

	01/09/2011	17/11/2011		29/11/2011
	Autour de l'essai	Parcellaire expérimental		Parcelle entière (sauf essai)
	Après la moisson et avant CIPAN	Avoine brésilienne	Vesce + avoine brésilienne	Phacélie
0-30cm	23	9	9	4
30-60cm	13	4	7	3
60-90cm	4	1	2	1
total	40	14	18	8
	Gr. Statistique	a	b	

Les APL mesurés sur le parcellaire expérimental ont été comparés à l'APL de référence de 2011 en céréales avec CIPAN (classe A2 - Figure 19) et sont qualifiés de bons pour les deux objets testés.

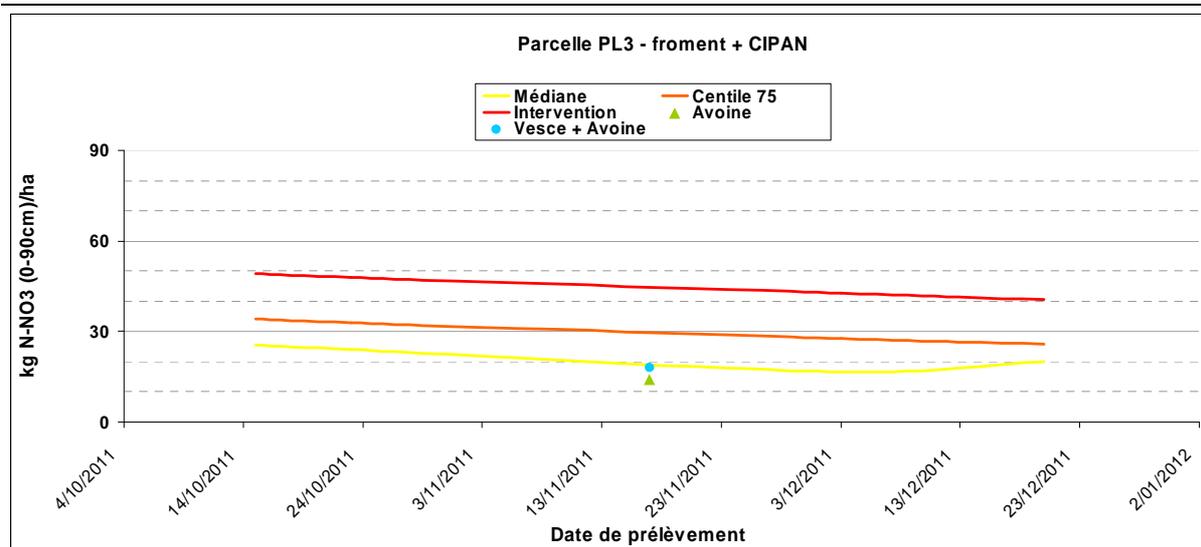


Figure 19. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 et APL de référence 2011 en céréales avec CIPAN

En conclusion, même si elle est faible en valeur absolue, une différence significative d'APL s'observe entre les deux objets testés dans cet essai (mélange céréale - légumineuse ou céréale seule). Le semis d'une avoine brésilienne a permis d'obtenir une valeur d'APL après froment assez faible.

6.4.4 2012 : haricot

En 2011, deux couverts avaient été testés sur le parcellaire expérimental après froment : une avoine brésilienne et un mélange de vesce et d'avoine brésilienne (cf. §6.4.3). Pour rappel, la différence de reliquat azoté de 4 kg N-NO₃⁻/ha mesurée après ces deux couverts était significative.

En 2012, un prélèvement de sol a été réalisé sur les deux objets du parcellaire expérimental le 30 mai pour mesurer le reliquat azoté avant le semis des haricots (Tableau 34). On observe une différence de 4 kg N-NO₃⁻/ha entre les deux parties du parcellaire expérimental ; cette différence n'est cependant pas significative. De ce fait, il était inutile d'assurer un suivi de l'impact des CIPAN semées en 2011 sur le rendement du haricot en 2012.

Les haricots ont été semés le 28 juin et 43 UN ont été appliquées par l'agriculteur sur l'ensemble de la parcelle (y compris le parcellaire expérimental) le 26 juin. Les haricots ont été récoltés le 10 septembre. Cette date plus tardive que prévu ne permettait pas de tester l'impact de l'implantation d'une CIPAN en interculture courte.

Tableau 34. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 (haricot) - 2012

	30/5/2012		6/12/2012
	Parcellaire expérimental		Autour de l'essai
	Haricot après avoine brésilienne	Haricot après vesce + avoine brésilienne	Froment après haricot
0-30cm	25	22	38
30-60cm	12	11	59
60-90cm	5	5	41
total	42	38	138
Gr. stat.	a		

Un froment a été semé sur cette parcelle le 25 octobre et un second prélèvement de sol a été réalisé le 6 décembre (Tableau 34). La quantité d'azote nitrique présente dans le sol à cette période est importante suite à la minéralisation des résidus de culture du haricot. Le profil établi à cette date montre qu'une quantité importante de nitrate est déjà en phase de lixiviation suite aux pluies de l'automne et qu'elle ne pourra plus être prélevée par le froment, se retrouvant à terme dans les eaux souterraines. L'APL mesuré en décembre autour de l'essai (Figure 20) est d'ailleurs qualifié de non-conforme, comparé à l'APL de référence de 2012 pour la classe 'légumes' (classe A7), malgré l'implantation d'un froment en octobre.

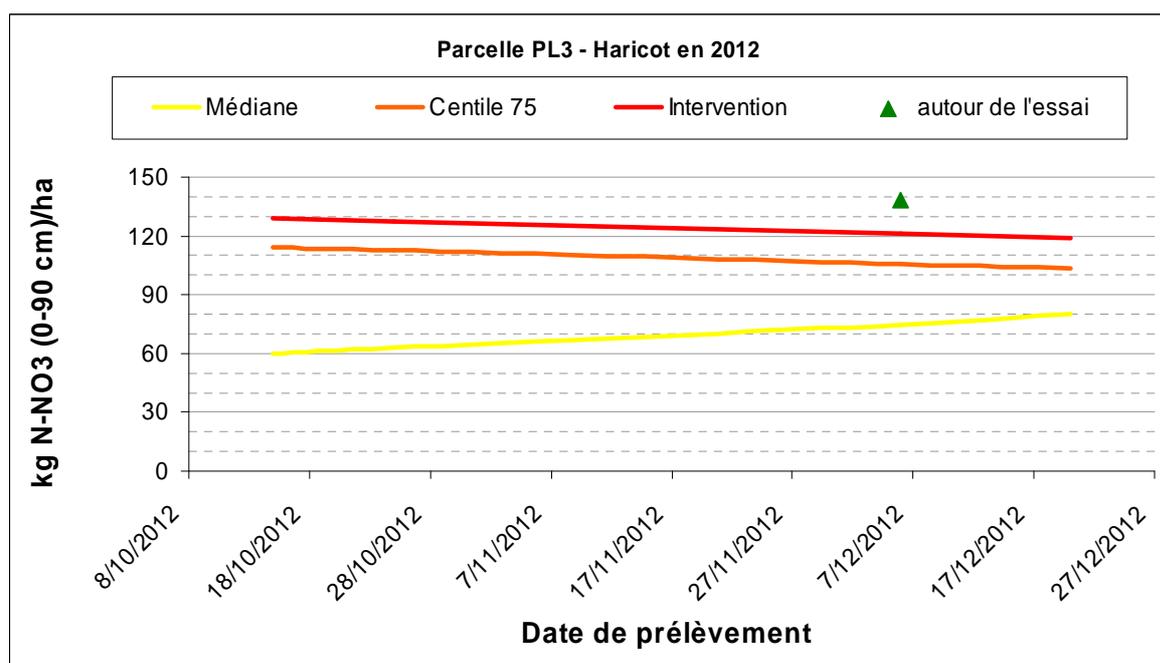


Figure 20. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle PL3 et APL de référence 2012 en légumes (classe A7)

Les observations réalisées dans cette parcelle illustrent donc la problématique d'une culture de haricot récoltée tardivement (après le 10 septembre) avant froment, à une période où le semis d'une CIPAN en interculture courte ne peut plus être garanti dans de bonnes conditions.

En conclusion, les deux couverts (avoine brésilienne et mélange avoine brésilienne – vesce) semés après froment sur cette parcelle en 2011 avaient permis d'obtenir des APL faibles. En 2012, les reliquats azotés mesurés dans les deux parties du parcellaire expérimental avant semis des haricots ne présentaient pas de différence significative.

6.4.5 2013 : froment

Un froment a été semé sur cette parcelle le 25 octobre. Aucune expérimentation n'a été menée.

6.4.6 Analyse des percolats

La saison de drainage 2010-2011 a débuté au mois de septembre 2010 (Tableau 35), grâce aux pluies importantes du mois d'août. Suite aux indications des piézomètres et au débordement des bidons de récolte dans la chambre de visite, la vanne à l'exutoire a été fermée en novembre 2010. Les teneurs en nitrate dans l'eau récoltée à cette période sont faibles (~ 30 mg NO₃⁻/l) suite à une culture de froment suivie d'une phacélie. Au cours de la période de fermeture de la vanne à l'exutoire de ce lysimètre, des échantillons d'eau ont cependant été récoltés après l'ouverture de la vanne pendant un court laps de temps (une à deux heures) ; ceci permet d'avoir une vue de la qualité de l'eau en phase de percolation et de l'eau de nappe (ou sa frange capillaire) captée par le lysimètre. On observe une augmentation importante des teneurs en nitrate dans l'eau récoltée à l'ouverture de la vanne (~ 140 mg NO₃⁻/l). L'impact de la succession fève des marais – épinard, qui avait laissé une quantité importante d'azote nitrique dans le sol à la récolte (137 kg N-NO₃⁻/ha) s'est donc fait ressentir sur la qualité de l'eau de percolation à cette période. A la réouverture du lysimètre en avril, les volumes récoltés étaient assez faibles et les concentrations restaient élevées (> 100 mg NO₃⁻/l).

La saison de drainage 2011-2012 a débuté fin décembre 2011, suite aux pluies importantes de ce mois. La vanne à l'exutoire du lysimètre a ensuite été fermée de janvier 2012 jusque fin mars 2012. La vanne a de nouveau été fermée durant les mois de juin et de juillet 2012, suite au constat de débordement des bidons de récolte. Durant toute cette période, les concentrations dans l'eau de percolation étaient de l'ordre 50 mg NO₃⁻/l, en baisse par rapport à l'année précédente.

Ce lysimètre ne s'est pas totalement tari au cours de l'année 2012. Suite au débordement des bidons de récolte, couplé aux indications de hauteur de nappe dans les piézomètres, la vanne à l'exutoire du lysimètre a été fermée du début du mois de novembre 2012 jusqu'à la fin du mois d'avril 2013. Les concentrations mesurées dans l'eau récoltée durant cette période étaient dans la continuité de celles mesurées l'année précédente, à savoir se situant entre 40 et 50 mg NO₃⁻/l. On a également observé une augmentation des concentrations en nitrate dans les échantillons récoltés au début de l'année 2013, lors des brèves périodes d'ouverture de la vanne à l'exutoire du lysimètre. Un pic de concentration a été observé au mois de février (124 mg NO₃⁻/l, moyenne mensuelle), à mettre en relation avec l'APL important (138 kg N-NO₃⁻/ha) observé après la culture de haricot en 2012, avant une diminution des concentrations jusqu'au mois de juin 2013.

Tableau 35. Parcelle PL3, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie	Irrigation	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(mm)	(l)	(mg NO ₃ /l)	(kg N-NO ₃ /ha)
Septembre 2010	48	-	73,2	35	5,8
Octobre	43	-	2,6	30	0,2
Novembre	86	-	1,1	23	0,1
Décembre	24	-	fermé	(148)	-
Janvier 2011	58	-	fermé	(134)	-
Février	23	-	fermé	(147)	-
Mars	13	-	fermé	(111)	-
Avril	16	-	7,1	97	1,6
Mai	0	-	0,2	107	0,1
Juin	44	-	0,3	106	0,1
Juillet	63	-	0,1	120	0,0
Août	110	-	0	-	-
DRAINAGE 2010-2011	528	0	84,6	40	7,7
Septembre	18	-	0	-	-
Octobre	25	-	0	-	-
Novembre	3	-	0	-	-
Décembre	121	-	0,2	115	0,1
Janvier 2012	69	-	fermé	(46)	-
Février	23	-	fermé	(54)	-
Mars	10	-	fermé	(54)	-
Avril	45	-	15,1	47	1,6
Mai	71	-	1,4	37	0,1
Juin	87	-	fermé	(64)	-
Juillet	116	-	fermé	(49)	-
Août	25	20	2,1	49	0,2
DRAINAGE 2011-2012	613	20	18,8	47	2,0
Septembre	27	20	5,7	48	0,6
Octobre	102	-	24,3	42	2,3
Novembre	25	-	fermé	(46)	-
Décembre	91	-	fermé	(55)	-
Janvier 2013	38	-	fermé	(94)	-
Février	29	-	fermé	(124)	-
Mars	18	-	fermé	(109)	-
Avril	20	-	fermé	(88)	-
Mai	84	-	28,0	61	3,9
Juin	42	-	37,5	49	4,2
DRAINAGE 2012-2013	476	20	95,4	51	11,0

6.4.7 Synthèse

La Figure 21 synthétise les mesures et observations pour la parcelle PL3 de septembre 2008 à juin 2013. Ce lysimètre est régulièrement fermé (à l'aide d'une vanne située à son exutoire) durant la période automnale et hivernale, durant laquelle le lysimètre intercepte la nappe ou sa frange capillaire. La récolte de volumes d'eau très importants, couplée aux mesures du niveau d'eau dans les piézomètres situés à proximité, permettent de préciser quand le lysimètre entre en phase de drainage de la nappe, nécessitant alors la fermeture de la vanne. La durée de la période de fermeture hivernale du lysimètre est variable et dépend des conditions climatiques et culturales.

Au cours de l'hiver 2010-2011, la vanne a été fermée à la mi-novembre 2010 et a été rouverte dans le courant du mois d'avril 2011. En 2011-2012, la vanne est restée fermée de janvier à mars 2012 et ensuite au cours des mois de juin et de juillet 2012. Enfin, la vanne est restée fermée depuis le début du mois de novembre 2012 suite au débordement des bidons de récolte jusque fin avril 2013. Lors de la période de fermeture du lysimètre, des échantillons d'eau ont malgré tout été récoltés après ouverture de la vanne pendant un court laps de temps (une à deux heures) ; ceci permet d'avoir une vue de la qualité de l'eau en phase de percolation et de l'eau de nappe (ou sa frange capillaire) captée par le lysimètre.

La première partie de ce graphique (années 2009 et 2010) confirme à nouveau que les teneurs en nitrate mesurées dans l'eau de percolation restent faibles après une succession betterave – froment – CIPAN correctement gérée au niveau de la fertilisation.

Contrairement à ce qui avait pu être observé sur la parcelle PL1 (cf. §6.3.6), l'introduction d'une double culture légumière fève des marais – épinard d'automne a eu pour conséquence une augmentation des concentrations en NO_3^- (de 100 à 150 mg/l) dans le lysimètre en 2011. Le rôle de CIPAN joué par les repousses d'épinard sur la parcelle PL1 en 2009 contrairement à la destruction de l'épinard après récolte sur la parcelle PL3 était certainement l'explication principale de cet écart (cf. rapport d'activités intermédiaire de février 2012).

Les concentrations sont restées stables au cours de l'année 2012 (~50 mg NO_3^- /l) et étaient en diminution par rapport à l'année 2011. La culture de froment suivie d'une avoine brésilienne qui avait laissé un APL faible en 2011 a donc contribué à limiter les teneurs en nitrate des eaux de percolation récoltées dans ce lysimètre en 2012.

Enfin, l'hiver 2012-2013 a été marqué par un pic de concentration (> 100 mg NO_3^- /l) au mois de février 2013, avant un retour progressif à des concentrations plus faibles (~50 mg NO_3^- /l) au mois de juin. Ce pic de concentration (limité dans le temps) peut certainement être expliqué par l'APL élevé (138 kg N- NO_3^- /ha) mesuré après la culture de haricot en décembre 2012. Il se confirme donc que le temps de réponse de la concentration à la base de ce lysimètre vis-à-vis de l'APL est très court (moins de six mois) lorsque celui-ci intercepte la nappe qui se trouve dès lors plus près de la surface.

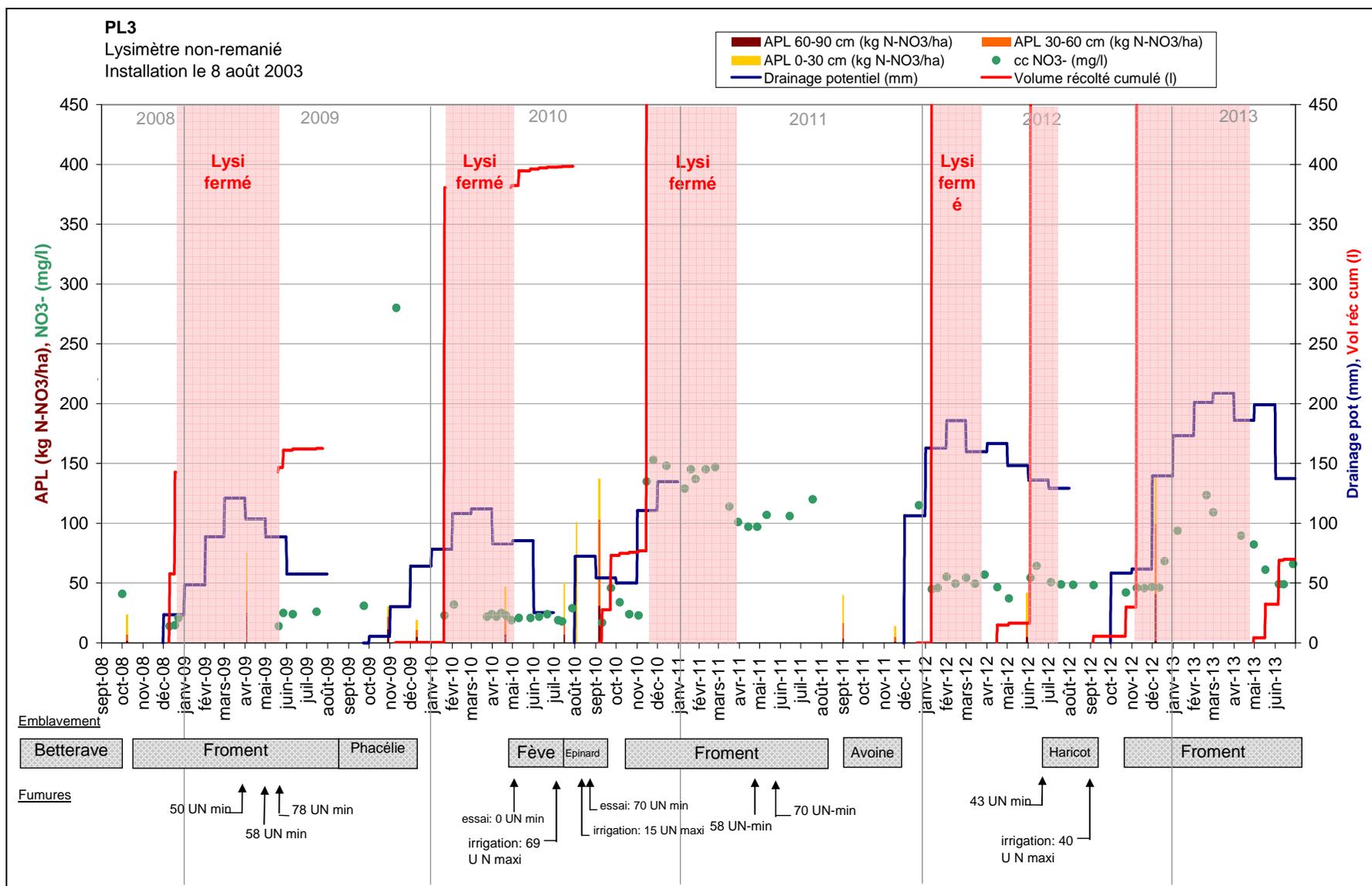


Figure 21. Synthèse des mesures et observations, parcelle PL3

6.5 Sole 4

Le lysimètre est de type remanié, installé en date du 8 août 2003.

L'historique cultural récent de cette parcelle est le suivant :

2008 : carotte

2009 : haricot

2010 : froment

2011 : pépinière d'arbres fruitiers (pommiers et poiriers)

2012 : pépinière d'arbres fruitiers (pommiers et poiriers)

2013 : pépinière d'arbres fruitiers (pommiers et poiriers)

6.5.1 2010 : froment

Un froment a été semé sur cette parcelle le 20 octobre 2009. Deux fractions de 62 UN et 80 UN ont été appliquées sur le froment le 19 avril 2010 et le 20 mai 2010 respectivement.

Cette parcelle n'a pas fait l'objet d'un essai de fertilisation azotée en 2010.

La moisson du froment a eu lieu le 31 juillet 2010 et les prélèvements de sol pour mesurer l'APL **sur l'ensemble de la parcelle** ont eu lieu le 28 octobre et le 15 décembre (Tableau 36).

Tableau 36. APL (kg N-NO₃/ha) sur la parcelle Sole 4 (froment) –2010

	28/10/2010	15/12/2010
0-30cm	8	8
30-60cm	7	10
60-90cm	9	9
total	24	27

Les APL mesurés sur cette parcelle en octobre et en décembre sont qualifiés de bon en octobre et en décembre, par rapport à l'APL de référence de 2010 en céréales sans CIPAN (classe A3).

6.5.2 2011 : pépinière de pommiers et de poiriers

Une pépinière d'arbres fruitiers a été installée sur la parcelle Sole 4 en 2011 pour une durée prévue de deux ans.

Le suivi lysimétrique de la qualité de l'eau en termes de nitrate sous une pépinière d'arbres fruitiers ne présentant que peu d'intérêt, il a été décidé de semer du ray-grass entre les lignes de plantations de la pépinière à l'aplomb du lysimètre (Photo 1) et d'exporter ce ray-grass pour reproduire le comportement d'une prairie de fauche. Les objectifs sont de:

- quantifier l'impact d'une prairie de fauche sur la qualité de l'eau de percolation ;
- évaluer l'intervalle de temps nécessaire pour réduire de manière significative la concentration en nitrate dans l'eau de percolation (supérieure à 200 mg/l au moment du semis du ray-grass) suite à l'implantation d'une prairie.



Photo 1. Ray-grass semé entre les lignes de plantations de la pépinière

Le ray-grass a été semé le 11 mai 2011. En pleine période de croissance du ray-grass (juillet – août – septembre), le ray-grass était tondu et exporté tous les 15 jours (Photo 2 et Photo 3).



Photo 2. Tonte du ray-grass sur la parcelle Sole 4



Photo 3. Exportation du ray-grass sur la parcelle Sole 4

Deux prélèvements de sol ont eu lieu sur cette parcelle en 2011 (Tableau 37) pour déterminer la quantité d'azote nitrique présente dans le sol : un premier prélèvement dans le ray-grass le 19 août et un second prélèvement le 28 novembre dans le ray-grass et autour de celui-ci, dans la pépinière.

Tableau 37. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) dans la parcelle Sole 4 (pépinière de pommiers et poiriers) - 2011

	19/08/2011	28/11/2011	
	Au niveau du ray-grass	Au niveau du ray-grass	Autour du ray-grass
0-30cm	6	2	192
30-60cm	6	2	66
60-90cm	7	1	14
total	19	5	272

Il apparaît que le ray-grass a parfaitement joué son rôle de piège à nitrate sur cette parcelle. Les deux profils établis au niveau du semis de ray-grass montrent des quantités d'azote nitrique très faibles. A la fin du mois d'août, le ray-grass avait déjà bien épuisé le profil.

En revanche, dans le reste de la parcelle (en dehors du ray-grass), la quantité d'azote nitrique présente dans le sol le 28 novembre est très importante. Sur cette parcelle, 146 kg N-NO₃⁻ ont été apportés en plus de 86 kg/ha sous forme d'urée. En plus de ces apports, plusieurs facteurs peuvent expliquer la valeur élevée de l'APL:

- le travail et l'affinage du sol ont été importants avant l'implantation de la pépinière dans la parcelle, au cours d'un mois d'avril particulièrement chaud. Sachant que trois irrigations ont eu lieu à la fin du mois d'avril et en mai (cf. §5), ces conditions ont largement favorisé une reprise précoce de la minéralisation ;
- des conditions climatiques propices à une minéralisation automnale (mois d'août humide et automne doux - cf. §4) ;
- le prélèvement de sol a eu lieu à la fin du mois de novembre, à une période où les feuilles tombées au sol ont déjà libéré une grande partie de leurs éléments nutritifs. On peut d'ailleurs observer que la couche 0-30cm contient la majorité de l'azote nitrique présent dans le sol à ce moment.

6.5.3 2012 : pépinière de pommiers et de poiriers

Devant la difficulté d'entretenir le ray-grass dans les interlignes des plantations prenant de plus en plus de place (tonte nécessaire tous les 15 jours en été), il a été décidé de ne pas conserver de ray-grass à l'aplomb du lysimètre en 2012.

En mars 2012, le ray-grass semé à l'aplomb du lysimètre a donc été détruit. Un prélèvement de sol a été réalisé le 7 mars pour déterminer la quantité d'azote nitrique présente au niveau du ray-grass et autour de celui-ci (Tableau 38). Il apparaît que le ray-grass a parfaitement joué son rôle de piège à nitrate, laissant des reliquats azotés très faibles dans le sol, tandis que le profil azoté réalisé autour du ray-grass montrait une importante migration du nitrate vers la profondeur (couche 60-90cm principalement).

Un second prélèvement de sol a été réalisé sur cette parcelle le 6 décembre (Tableau 38). L'absence de ray-grass à l'aplomb du lysimètre se marque au niveau du reliquat azoté particulièrement élevé en décembre. En 2012, 160 kg N-NO₃⁻ ont été apportés en plus de 90 kg/ha sous forme d'urée. La quantité d'azote nitrique mesurée peut également s'expliquer par :

- la restitution au sol de l'azote prélevé par le ray-grass l'année précédente;
- la restitution des éléments nutritifs par les feuilles des arbres fruitiers tombées au sol ;
- la minéralisation de l'humus du sol favorisée par un printemps et un automne humides.

Le profil azoté établi en décembre au niveau du parcellaire expérimental (après ray-grass) montre une importante quantité d'azote nitrique dans la couche 60-90cm, signe que celui-ci est en cours de lixiviation suite à la restitution d'azote par le ray-grass détruit dès le printemps. Au total, entre mars et décembre, le profil s'est enrichi de 275 kg N-NO₃⁻/ha à

l'aplomb du lysimètre. Le sol n'étant pas couvert sur cette parcelle durant l'hiver, cette importante quantité d'azote nitrique se retrouvera à terme dans les eaux souterraines.

Le profil azoté établi autour du parcellaire expérimental en décembre montre que l'azote nitrique est principalement localisé dans la couche 30-60cm ; le phénomène prédominant dans ce cas est donc la restitution d'azote par les feuilles tombées au sol à l'automne et déjà en cours de lixiviation.

Tableau 38. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur dans la parcelle Sole 4 (pépinière de pommiers et poiriers) - 2012

	7/3/2012		6/12/2012	
	Au niveau du ray-grass (parcellaire expérimental)	Autour du ray-grass (parcellaire expérimental)	Au niveau du parcellaire expérimental	Autour du parcellaire expérimental
0-30cm	3	12	19	65
30-60cm	2	55	120	119
60-90cm	1	126	142	84
total	6	193	281	268

6.5.4 2013 : pépinière de pommiers et poiriers

Les arbres fruitiers sont progressivement arrachés sur cette parcelle depuis la fin de l'année 2012. En juin 2013, les arbres implantés à l'aplomb du lysimètre n'avaient toujours pas été arrachés.

6.5.5 Analyse des percolats

La saison de drainage 2010-2011 s'est étalée de janvier 2011 jusque fin avril 2011 (Tableau 39). Au cours de celle-ci, 17% de la pluviométrie totale de la période ont été récoltés à l'exutoire du lysimètre. Les concentrations en nitrate dans l'eau récoltée à l'exutoire du lysimètre étaient élevées (205 mg NO₃⁻/l en moyenne), même si une tendance à la baisse se marquait (de 210 à 175 mg NO₃⁻/l). Au total, l'équivalent de 45 kg N-NO₃⁻/ha ont été récoltés à l'exutoire de ce lysimètre durant cette période.

Au cours de la saison de drainage 2011-2012, la percolation a repris tardivement, en janvier 2012. 146l ont été récoltés à l'exutoire de ce lysimètre au cours de cette saison de drainage, représentant 24% de la pluviométrie enregistrée sur la même période. Ces valeurs sont les plus élevées parmi celles observées sur tous les lysimètres cette année, tout en restant dans une gamme de valeurs attendue. Au cours de cette saison de drainage, les concentrations dans l'eau de percolation sont restées élevées, entre 110 et 125 mg NO₃⁻/l (à l'exception d'un échantillon de faible volume en octobre). Compte tenu des concentrations élevées et des volumes importants récoltés, la quantité d'azote nitrique lixivié au cours de cette saison de drainage est également importante (37 kg N-NO₃⁻/ha).

Dès le mois de novembre 2012, la percolation a repris abondamment dans ce lysimètre. A la fin du mois de juin, ce lysimètre n'était pas encore tari et 170l avaient déjà été récoltés tout au long de la saison de drainage, représentant 35% des précipitations sur la même période. Dès le début de la saison de drainage en novembre 2012, les concentrations dans l'eau récoltée étaient en diminution (passage de 103 mg NO₃⁻/l en novembre 2012 à 54 mg NO₃⁻/l en février 2013), ce qui souligne l'efficacité du ray-grass semé à l'aplomb du lysimètre en 2011 pour réduire la lixiviation du nitrate. A partir du mois de février cependant, on a observé une augmentation des concentrations dans l'eau de percolation, à mettre en relation avec la destruction du ray-grass en mars 2012. On peut donc estimer à 11 mois (dans ces conditions climatiques et culturales) le temps nécessaire pour que l'impact d'une (modification de) pratique en surface commence à être visible sur la qualité (en terme de nitrate) de l'eau de percolation récoltée à une profondeur de 2m.

Tableau 39 : Parcelle sole 4, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie	Irrigation	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(mm)	(l)	(mg NO ₃ /l)	(kg N-NO ₃ /ha)
Septembre 2010	48	-	0	-	-
Octobre	43	-	0	-	-
Novembre	86	-	0	-	-
Décembre	24	-	0	-	-
Janvier 2011	58	-	67,7	210	32,0
Février	23	-	21,4	198	9,5
Mars	13	-	6,9	188	2,9
Avril	16	15	0,6	175	0,2
Mai	0	40	0	-	-
Juin	44	-	0,1	207	0,0
Juillet	63	-	0,2	175	0,1
Août	110	-	0	-	-
DRAINAGE 2010-2011	528	55	96,9	205	44,9
Septembre	18	-	0	-	-
Octobre	25	-	0	-	-
Novembre	3	-	0	-	-
Décembre	121	-	0	-	-
Janvier 2012	69	-	31	88	6,2
Février	23	-	22,5	114	5,8
Mars	10	-	23,2	122	6,4
Avril	45	-	2,6	120	0,7
Mai	71	-	4,7	118	1,3
Juin	87	-	25,2	125	7,1
Juillet	116	-	24,8	117	6,6
Août	25	-	11,6	113	3,0
DRAINAGE 2011-2012	601	0	145,6	112	36,9
Septembre	27	-	1,3	112	0,3
Octobre	102	-	0,2	408	0,2
Novembre	25	-	34,7	103	8,0
Décembre	91	-	25,8	87	5,1
Janvier 2013	38	-	21,3	66	3,2
Février	29	-	39,4	54	4,8
Mars	18	-	17,0	62	2,4
Avril	20	-	20,3	73	3,3
Mai	84	-	0,8	80	0,1
Juin	42	-	9,7	98	2,1
DRAINAGE 2012-2013	476	0	170,4	77	29,6

6.5.6 Synthèse

La Figure 22 synthétise les mesures et observations pour la parcelle Sole 4 de septembre 2008 à juin 2013.

A l'installation de la pépinière en mai 2011, les teneurs en nitrate dans l'eau de percolation étaient particulièrement élevées ($\sim 200 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$) à l'exutoire de ce lysimètre depuis quelques années (2009, 2010, 2011). Les concentrations ont commencé à augmenter en 2008, à la suite d'une culture de froment sans CIPAN. Par après, ces concentrations sont restées élevées, malgré des APL qui étaient, à une exception près, beaucoup plus faibles ($24 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$ après carotte en 2008, $103 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$ après haricot en 2009, $24 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$ après froment en 2010). Le fait que le sol n'ait pas été couvert durant plusieurs intercultures longues (après froment en 2007 et 2010) apporte peut-être une piste d'explication à ce constat.

En 2011, un ray-grass a été semé à l'aplomb du lysimètre, en interligne de la pépinière d'arbres fruitiers, dans le but de quantifier l'impact d'une prairie de fauche sur la qualité de l'eau de percolation. Les mesures à l'exutoire de ce lysimètre en 2012 montrent l'efficacité de ce ray-grass pour piéger le nitrate, les teneurs en nitrate dans l'eau de percolation passant de $\sim 120 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ au début de l'année 2012 à $\sim 50 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ au début de l'année 2013.

Par la suite, après le mois de février 2013, les concentrations des échantillons d'eau récoltés dans ce lysimètre ont progressivement augmenté. Il faut certainement y voir une conséquence directe de la destruction du ray-grass à l'aplomb du lysimètre en mars 2012, comme le confirme l'APL particulièrement élevé ($281 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$) mesuré en décembre 2012. Cette valeur fait d'ailleurs craindre une poursuite de l'augmentation des concentrations dans l'eau de percolation au cours de la deuxième moitié de l'année 2013. Au final, il est possible, sur ce lysimètre, d'estimer l'intervalle de temps entre une action en surface (destruction du ray-grass – mars 2012) et son impact sur la qualité de l'eau à 2m de profondeur (augmentation des teneurs en nitrate – mars 2013) à environ 12 mois.

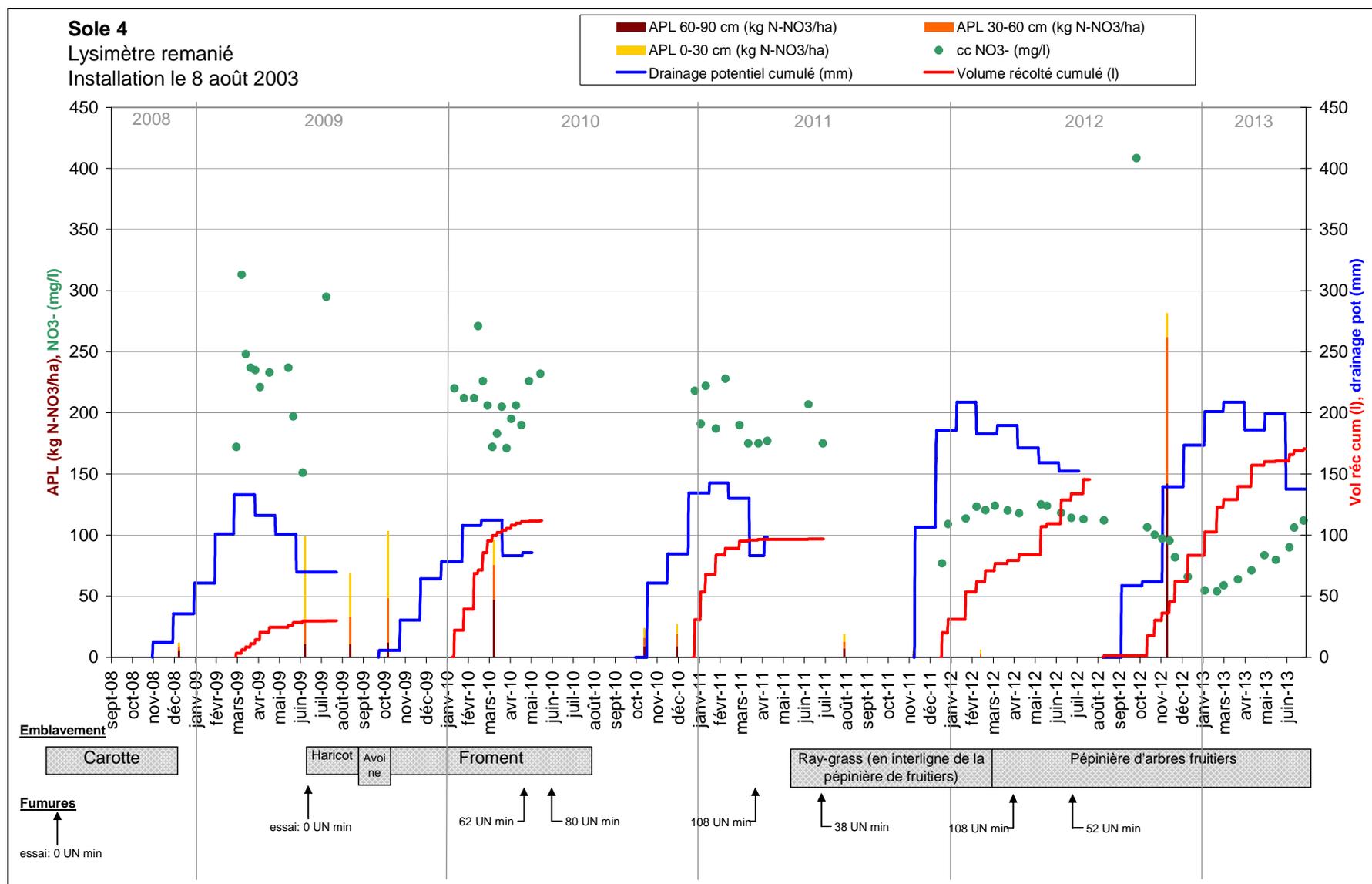


Figure 22. Synthèse des mesures et observations, parcelle Sole 4

6.6 Haute Bova

Ce lysimètre de type remanié a été le dernier installé. Initialement installé dans une autre parcelle située à proximité (Grosse Pierre Petit Pont), il a été déplacé en date du 13 août 2009.

L'historique cultural récent de cette parcelle est le suivant :

2008 : chicorée
 2009 : froment suivi de CIPAN
 2010 : betterave
 2011 : froment suivi de CIPAN
 2012 : pois
 2013 : froment

Du fumier de bovin (33 t/ha) a été apporté sur cette parcelle en août 2009, après la moisson du froment. Du compost (10 t/ha) a été apporté au mois d'août 2011.

6.6.1 2010 : betterave

Le semis des betteraves a été effectué le 13 avril. Les sous-parcelles sont de dimension 5x8m et sont séparées par des chemins d'une largeur de 1m (Figure 3).

Le profil azoté en vue du conseil de fumure a été établi sur les sous-parcelles de l'essai le 14 avril (Tableau 40).

Tableau 40. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) sur le parcellaire expérimental de la parcelle Haute Bova (betterave) - 2010

	14/4/2010		30/9/2010	
	0 UN à appliquer sur 5 sous-parcelles	78 UN à appliquer sur 4 sous-parcelles	0 UN appliquées sur 5 sous-parcelles	78 UN appliquées sur 4 sous-parcelles
0-30cm	33	31	8	10
30-60cm	25	25	5	6
60-90cm	16	17	3	3
total	74	73	16	19
		Gr. Statistique	a	

La quantité d'azote nitrique présent dans le sol jusque 90cm de profondeur en avril 2010 (Tableau 40) est relativement importante, suite notamment à l'application de 33 t/ha de fumier bovin en août 2009, après la moisson du froment.

Suite à ces profils, un scénario 0 UN a été testé sur les sous-parcelles P1, P3, P6, P8 (Figure 3) ainsi qu'à l'aplomb du lysimètre. 78 UN minéral ont été appliquées sur les sous-parcelles P2, P4, P5, P7 le 23 avril. L'agriculteur a appliqué 65 UN sur l'ensemble de sa parcelle, à l'exception de l'essai.

Les betteraves ont été arrachées le 28 septembre.

Les profils post-récolte du 30 septembre (Tableau 40) sont peu chargés en azote nitrique, surtout dans les horizons intermédiaires et profonds, soulignant une bonne utilisation de l'azote par la betterave au cours de son cycle de culture. On n'observe pas de différence entre les reliquats azotés post-récolte mesurés sur les deux parties de l'essai en betterave en 2010.

Compte tenu de l'arrachage précoce des betteraves sur cette parcelle (avant le 15 octobre), il n'est pas possible de comparer les reliquats azotés post-récolte mesurés sur le parcellaire expérimental avec les APL de référence établis en 2010 pour la betterave (classe A1).

Les rendements « matière fraîche » ainsi que les rendements « sucre » ont été mesurés individuellement sur les différentes sous-parcelles de l'essai. Les moyennes de ces rendements sont présentées dans le Tableau 41.

Tableau 41. Rendement total et rendement sucre obtenus sur l'essai de la parcelle Haute Bova (betterave) - 2010

Fumure appliquée (kg N/ha)	0 UN	78 UN
Rendement « matière fraîche » (t/ha)	76,7	82,2
	a	
Richesse (%)	17,4	17,2
Rendement « sucre » (t/ha)	13,3	14,1
	a	

L'absence de fertilisation azotée minérale induit une légère baisse de rendement (- 0,8 t/ha en sucre). La richesse est par contre légèrement plus importante sur les sous-parcelles « 0 UN ». Les différences de rendement « matière fraîche » et de rendement « sucre » ne sont cependant pas considérées comme significatives par l'analyse statistique.

A titre de comparaison, le rendement « matière fraîche » moyen obtenu sur la parcelle s'élève à 74,5 t/ha. Il est cependant difficile de comparer les rendements obtenus par l'arrachage mécanique des betteraves sur l'ensemble de la parcelle aux rendements obtenus par l'arrachage manuel des betteraves sur le parcellaire expérimental.

En conclusion, sur cette parcelle et dans les conditions (culturales, climatiques,...) de 2010, la diminution du conseil de 78 kg N/ha sur 4 sous-parcelles de l'essai en betterave n'a engendré ni perte significative de rendement ni diminution d'APL ; l'apport de 78 kg N/ha s'est donc révélé inutile à posteriori.

6.6.2 2011 : froment

Un froment a été implanté sur cette parcelle le 10 octobre 2010. Compte tenu du fait que deux essais portant sur la gestion de l'interculture après froment ont été mis en place dans deux autres parcelles équipées d'un lysimètre (cf. parcelles PL1 - §6.3.2 et PL3 - §6.4.3), il a été décidé de ne pas mener d'essai sur cette parcelle en 2011.

Sur l'ensemble de la parcelle, l'agriculteur a apporté 165 UN minéral au printemps ainsi que 10 t/ha de compost (à 13,82 kg/t) après la récolte du froment fin août. Une moutarde a été semée le 1^{er} septembre. Deux profils azotés ont été établis sur l'ensemble de la parcelle les 27 octobre et 7 décembre (Tableau 42). On peut voir que les APL sont faibles, reflétant les bonnes conditions d'implantation des CIPAN en 2011 et par conséquent leur prélèvement efficace d'azote nitrique.

Tableau 42. APL (kg N-NO₃⁻/ha) sur la parcelle Haute Bova (froment + moutarde) - 2011

	27/10/2011	07/12/2011
	Sur l'ensemble de la parcelle	
0-30cm	9	8
30-60cm	10	5
60-90cm	5	2
total	24	15

6.6.3 2012 : pois

Un pois a été semé sur cette parcelle le 18 mai 2012 et a été récolté le 12 août. Il n'y a pas eu d'apport d'azote sur cette parcelle. L'essai a porté sur la gestion de l'interculture entre la récolte du pois et le semis d'un froment à l'automne.

Un prélèvement de sol a été réalisé sur le parcellaire expérimental le 13 août (Tableau 43). Les reliquats azotés mesurés en post-récolte du pois sont relativement élevés et sont principalement localisés dans la couche 0-30cm. La différence de reliquat azoté post-récolte entre les deux parties du parcellaire expérimental n'est pas significative.

Tableau 43. Reliquats azotés (kg N-NO₃⁻/ha) sur la parcelle Haute Bova (pois) - 2012

	13/8/2012		15/10/2012		
	Parcellaire expérimental (après pois)		Parcellaire expérimental		Autour du parcellaire expérimental
	Avant nyger	Avant moutarde	Après nyger	Après moutarde	Après sol nu
0-30cm	44	47	47	30	72
30-60cm	20	23	63	19	74
60-90cm	9	10	19	12	21
total	73	80	129	61	167
		Gr. statistique	b	a	c

Le 20 août, un nyger a été semé sur les sous-parcelles P1, P3, P6, P8 et à l'aplomb du lysimètre (Figure 3) et une moutarde a été semée sur les sous-parcelles P2, P4, P5 et P7. Par ailleurs, quatre zones situées autour du parcellaire expérimental n'ont pas été couvertes entre la récolte du pois et le semis du froment en automne, servant de témoin. Les CIPAN ont été détruites le 11 octobre et un prélèvement de sol a été réalisé le 15 octobre avant le semis du froment (Tableau 43).

On peut voir que les différences de reliquat azoté sont importantes et significatives selon le couvert implanté. Sur la partie restée en sol nu autour du parcellaire expérimental, la minéralisation des résidus de culture de pois se marque dans les couches 0-30cm et 30-60cm avec une quantité importante d'azote nitrique présente dans ces deux couches ; le froment semé sur cette parcelle à l'automne n'ayant qu'une capacité limitée de prélèvement de l'azote nitrique avant l'hiver et la période de lixiviation, il est probable qu'une part importante de cet azote se retrouvera *in fine* dans les eaux souterraines.

Par rapport au sol nu, le nyger a prélevé 38kg N-NO₃⁻/ha, la différence se marquant principalement dans la couche 0-30cm. La moutarde a quant à elle prélevé 106kg N-NO₃⁻/ha,

la différence se marquant essentiellement dans les couches 0-30cm et 30-60cm. Toutes ces différences de reliquat azoté sont significatives selon l'analyse statistique.

Ces résultats ont été comparés à l'APL de référence 2012 en légumes (classe A7 - Figure 23). Les APL obtenus sur le parcellaire expérimental sont qualifiés de satisfaisant après moutarde, de limite après nyger et de non conforme après sol nu.

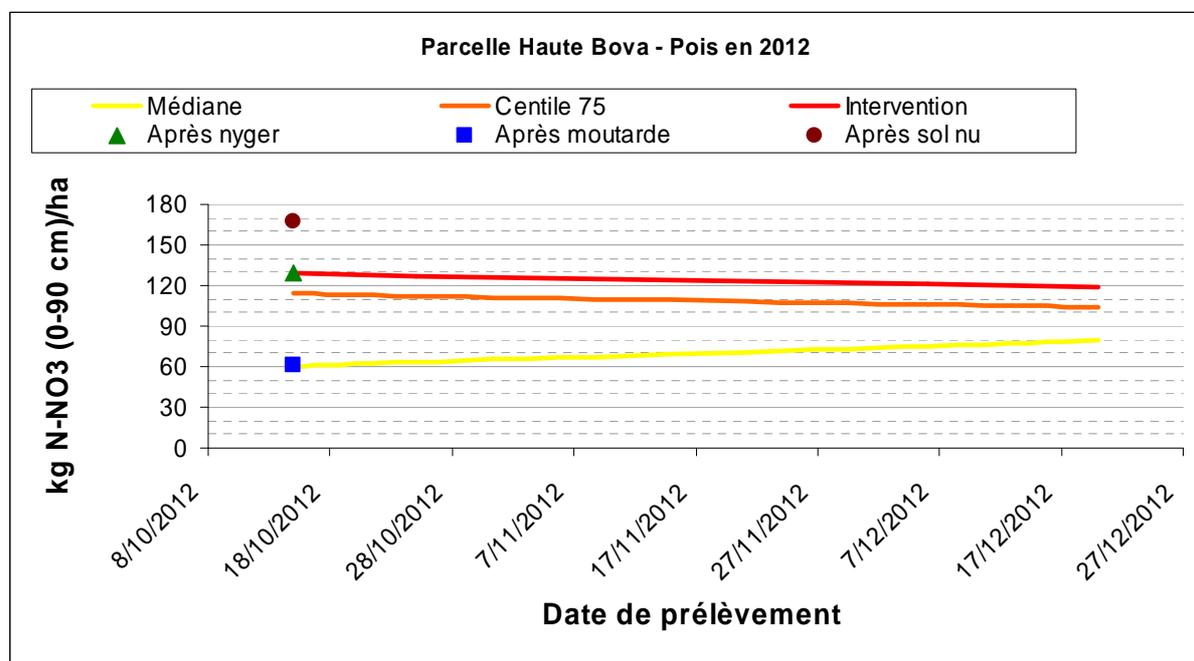


Figure 23. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Haute Bova et APL de référence 2012 en légumes (classe A7)

Il est possible de comparer les résultats de cet essai avec les résultats de l'essai mené sur la parcelle 'Jeneffe' (hors site lysimétrique) en 2011 (cf. §6.7.3). Sur cette parcelle, un nyger semé le 29 juillet après pois avait prélevé plus de 120kg N-NO₃⁻/ha, soit environ 80kg N-NO₃⁻/ha de plus que sur la parcelle Haute Bova en 2012. La différence principale entre ces deux essais se situe au niveau de la date de semis des couverts (29 juillet vs 20 août). Il apparaît donc que l'efficacité de prélèvement d'azote nitrique par le nyger diminue avec sa date d'implantation ; semé en juillet après récolte des pois, le nyger est à même de prélever des quantités importantes d'azote nitrique alors que pour un semis prévu en août, il est préférable de se tourner vers une moutarde. Ceci corrobore les enseignements de l'essai de démonstration CIPAN mis en place en 2007 par Nitrawal asbl à Malèves Sainte Marie⁹.

En conclusion, sur cet essai où les couverts ont été semés le 20 août après récolte des pois, la moutarde s'est révélée plus efficace que le nyger pour limiter le reliquat azoté avant semis du froment. D'autres essais ont cependant mis en évidence la capacité du nyger à piéger le nitrate, pour autant qu'il soit semé assez tôt.

⁹ http://www.nitrawal.be/upload_files/6.3.3/2007-Demo_CIPAN_Perwez.pdf

6.6.4 2013 : froment

Un froment a été semé sur cette parcelle le 16 octobre 2012. L'impact des CIPAN (moutarde et nyger) semées en interculture courte après pois en 2012 sur le reliquat azoté et sur le rendement et la qualité du froment a été évalué.

Des prélèvements de sol ont été réalisés sur le parcellaire expérimental (après moutarde et après nyger) et autour de celui-ci (zone témoin sans CIPAN) le 6 mars 2013 pour mesurer le reliquat azoté en sortie d'hiver (Tableau 44). Les différences de reliquats azotés entre les objets testés ne sont pas significatives, contrairement à ce qui avait été observé en octobre 2012 (cf. §6.6.3). Il est probable que le stock important d'azote mesuré dans le sol en octobre 2012 soit descendu sous la profondeur de mesure des reliquats azotés (90 cm) suite aux pluies abondantes de l'hiver. Par la suite, 130 UN ont été appliquées au printemps sur le froment.

Le froment a été récolté le 13 août 2013. Des prélèvements de sol ont été réalisés sur le parcellaire expérimental et autour de celui-ci le 19 août 2013. Les différences de reliquats azotés mesurées entre les objets testés sont faibles et ne sont pas significatives.

Tableau 44. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés dans la parcelle Haute Bova – froment en 2013 après pois en 2012

	6/3/2013			19/8/2013		
	Parcellaire expérimental		Autour du parcellaire expérimental	Parcellaire expérimental		Autour du parcellaire expérimental
	Froment après nyger	Froment après moutarde	Froment après sol nu	Froment après nyger	Froment après moutarde	Froment après sol nu
0-30cm	11	12	11	27	28	28
30-60cm	10	14	11	6	6	7
60-90cm	19	22	21	3	3	3
total	40	48	43	36	37	38
Gr. statistique	a			a		

L'impact du nyger et de la moutarde sur le rendement et la qualité du froment a été évalué (Tableau 45). Ce tableau montre que les rendements mesurés sont élevés et ne sont pas significativement différents entre les itinéraires testés (nyger, moutarde ou sol nu entre pois et froment). On n'observe pas non plus de différence significative pour les paramètres de qualité de récolte (poids spécifique, taux de protéines et indice de Zéleny), même si ceux-ci sont relativement médiocres.

Tableau 45. Rendement et qualité de la récolte sur le parcellaire expérimental de la parcelle Haute Bova (froment après pois) - 2013

	Nyger	Moutarde	Sol nu
Rendement (15% hum) (kg/ha)	11441	11525	11566
	a		
Poids spécifique (kg/hl)	76,4	76,8	76,4
	a		
Protéines (%)	11,0	10,6	11,2
	a		
Zéleny (ml)	20,5	19,2	20,5
	a		

En conclusion, les CIPAN (nyger et moutarde) semées en interculture courte après la récolte d'un pois n'ont pas eu d'impact sur les rendements, la qualité du froment semé à l'automne et les reliquats azotés mesurés l'année suivante.

6.6.5 Analyse des percolats

La saison de drainage 2010-2011 s'est étalée d'octobre 2010 jusqu'en avril 2011 (Tableau 46). 114 l ont été récoltés à l'exutoire du lysimètre durant cette période, prouvant là le bon fonctionnement hydrologique de ce lysimètre deux ans après son installation dans cette parcelle. Mis à part à la reprise de la percolation, en octobre et en novembre 2010 (où les volumes récoltés étaient faibles), les teneurs en nitrate étaient faibles (14 mg NO₃⁻/l en moyenne) ; l'apport de matière organique (fumier de bovin) à l'automne 2009 ne s'est donc pas fait ressentir sur la qualité (en termes de NO₃⁻) de l'eau de percolation récoltée à 2m de profondeur.

La saison de drainage 2011-2012 n'a permis la récolte que de très faibles volumes d'eau (moins d'un litre). La couverture hivernale du sol par une moutarde pourrait apporter une partie d'explication. Les concentrations en nitrate dans les faibles volumes d'eau récoltés étaient inférieures ou égales à 40 mg NO₃⁻/l, suite à une succession betterave – froment – CIPAN et malgré l'apport de matière organique (fumier et compost) en 2009 et 2011.

La percolation a véritablement repris sur cette parcelle en décembre 2012. Au cours de cette saison de drainage, un volume important (160l) a été récolté à l'exutoire de ce lysimètre. Les concentrations mesurées à la reprise de la percolation, en décembre, étaient dans la continuité de ce qui avait été observé auparavant dans ce lysimètre et étaient inférieures à 40 mg NO₃⁻/l. Par la suite, à partir du mois de février, les concentrations dans l'eau de percolation ont augmenté pour dépasser les 170 mg NO₃⁻/l au mois de juin 2013. Cette augmentation peut s'expliquer par la culture de pois (suivie d'un nyger à l'aplomb du lysimètre) sur cette parcelle en 2012, entraînant un APL élevé (129 kg N-NO₃⁻/ha).

Tableau 46. Parcelle Haute Bova, observations mensuelles des volumes et concentrations en nitrate

Mois	Pluviométrie	Irrigation	Volumes récoltés	Concentration moyenne mensuelle	Quantité d'azote nitrique lixivié
	(mm)	(mm)	(l)	(mg NO ₃ /l)	(kg N-NO ₃ /ha)
Septembre 2010	48	-	0	-	-
Octobre	43	-	0,1	90	0,0
Novembre	86	-	0,4	46	0,0
Décembre	24	-	0	-	-
Janvier 2011	58	-	59,0	9	1,2
Février	23	-	41,0	18	1,7
Mars	13	-	12,5	24	0,7
Avril	16	-	0,4	34	0,0
Mai	0	-	0	-	-
Juin	44	-	0,3	38	0,0
Juillet	63	-	0,2	37	0,0
Août	110	-	0	-	-
DRAINAGE 2010-2011	528	0	114,0	15	3,8
Septembre	18	-	0	-	-
Octobre	25	-	0	-	-
Novembre	3	-	0	-	-
Décembre	121	-	0,4	34	0
Janvier 2012	69	-	0	-	-
Février	23	-	0	-	-
Mars	10	-	0	-	-
Avril	45	-	0	-	-
Mai	71	-	0	-	-
Juin	87	-	0	-	-
Juillet	116	-	0,5	40	0,05
Août	25	-	0	-	-
DRAINAGE 2011-2012	613	0	0,9	37	0,05
Septembre	27	-	0	-	-
Octobre	102	-	0,2	93	0,0
Novembre	25	-	0,1	46	0,1
Décembre	91	-	21,8	43	2,1
Janvier 2013	38	-	33,5	46	3,5
Février	29	-	59,5	85	11,5
Mars	18	-	23,2	162	8,5
Avril	20	-	19,6	177	7,8
Mai	84	-	0	-	-
Juin	42	-	2,3	171	0,9
DRAINAGE 2012-2013	476	0	160,1	95	34,3

6.6.6 Synthèse

La Figure 24 synthétise les mesures et observations sur la parcelle Haute Bova de novembre 2008 à juin 2013.

Après son implantation en août 2009, le lysimètre installé sur la parcelle Haute Bova a commencé à débiter de l'eau de percolation en mars 2010, avec des teneurs en nitrate relativement faibles ($\sim 35 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$), à la suite d'une culture de froment suivie d'une moutarde (avec apport de 33 t/ha de fumier bovin).

En 2010, la betterave mise en place sur cette parcelle a laissé un reliquat azoté très faible (16 kg N- NO_3^-/ha). Les teneurs en nitrate dans l'eau de percolation récoltée durant la saison de drainage suivante (2010-2011) étaient du même ordre de grandeur ($\sim 25 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$). Les observations sur ce lysimètre soulignent à nouveau l'intérêt de la succession betterave – froment – CIPAN pour la récolte d'une eau de percolation de bonne qualité (en termes de nitrate).

La saison de drainage 2011-2012 n'a permis la récolte que de très faibles volumes d'eau de percolation. Celle-ci présentait des faibles concentrations en nitrate (inférieures à $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$), malgré l'apport de 10 t/ha de compost fin août 2011.

A la reprise de la percolation en décembre 2012, l'eau récoltée était à nouveau faiblement chargée en nitrate. Par contre, dès le début de l'année 2013, les concentrations dans l'eau de percolation ont fortement augmenté et s'élevaient à $\sim 175 \text{ mg NO}_3^-/\text{l}$ au mois de juin 2013. La minéralisation des résidus de culture de pois et le faible développement du nyger implanté entre les cultures de pois et de froment (comme en atteste l'APL élevé mesuré en octobre 2012 – $129 \text{ kg N-NO}_3^-/\text{ha}$) ont donc impacté les concentrations en nitrate dans les eaux de percolation récoltées durant la première moitié de l'année 2013.

Globalement, les observations réalisées sur ce lysimètre depuis trois ans montrent que l'application régulière (tous les deux ans) de matière organique (fumier de bovin en 2009 et compost en 2011) dans une rotation betterave – froment - CIPAN n'a pas causé de dégradation significative de la qualité de l'eau de percolation (en termes de nitrate), pour autant que les quantités apportées ne dépassent pas les limites fixées par le PGDA (cf. parcelle grosse pierre chemin de fer : apport de 600 kgN/ha en un seul épandage de compost). Par contre, il apparaît clairement que les modes de gestion de l'interculture et des successions culturales ont un impact prépondérant sur les pertes de nitrate vers les eaux souterraines.

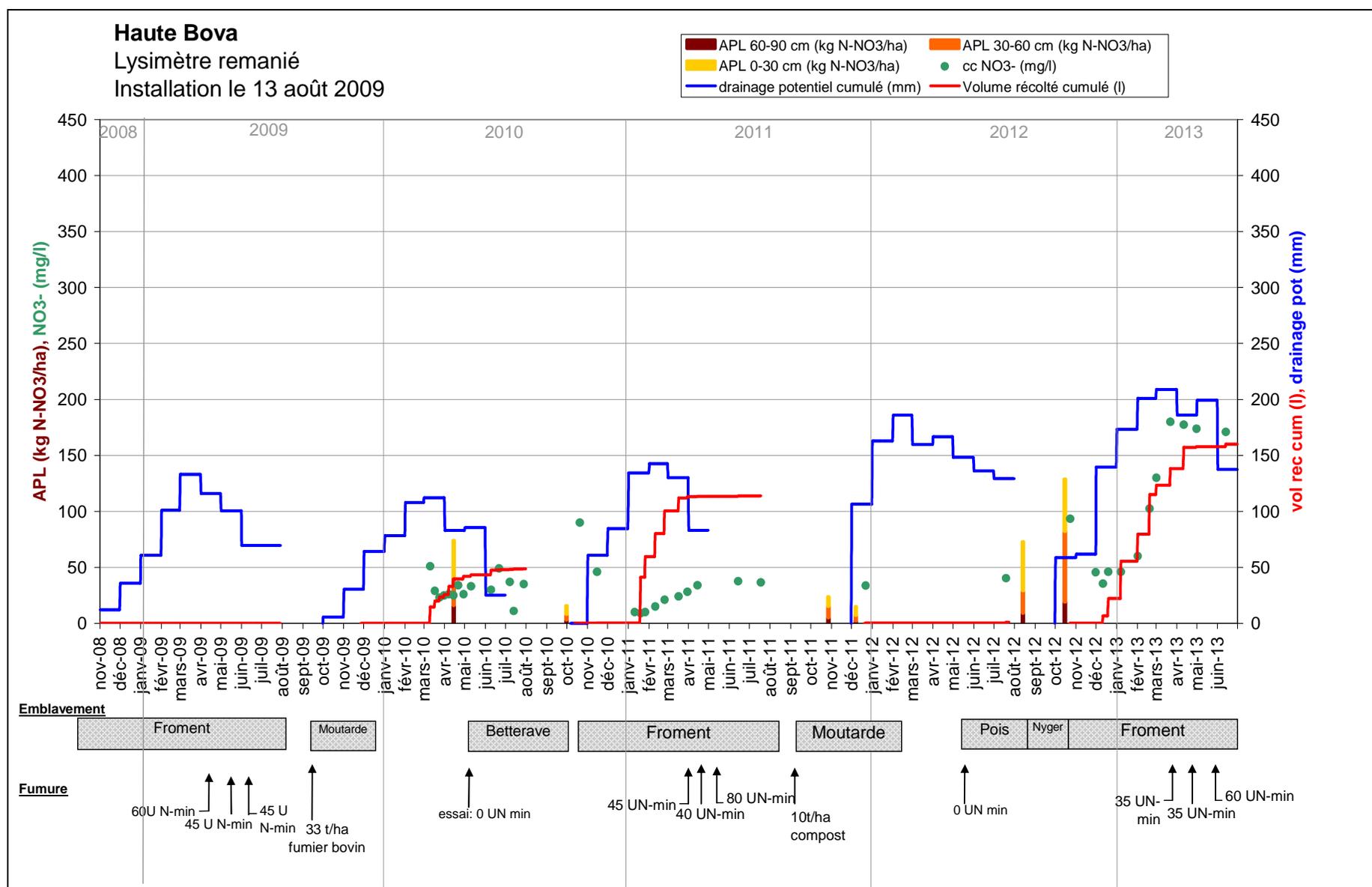


Figure 24. Synthèse des mesures et observations, parcelle Haute Bova

6.7 Parcelles non-équipées d'un lysimètre

Trois parcelles non-équipées d'un lysimètre ont fait l'objet d'un essai en 2011 (cf. §3.3.1), portant sur la réduction du conseil de fertilisation en carotte et en fève des marais et sur la gestion de l'interculture après pois. Ces trois parcelles se situent dans les communes de Forville, Berloz et Jeneffe respectivement.

En 2012, deux essais ont été mis en place dans des parcelles qui ne sont pas équipées de lysimètre, portant sur la réduction du conseil de fertilisation en carotte et en fève des marais. Ces parcelles se situent sur sol limoneux profond, dans les communes de Tourinne et d'Omali respectivement. Par ailleurs, le suivi de l'essai mené en 2011 sur la gestion de l'interculture après récolte de pois a été assuré en 2012, dans la commune de Jeneffe. Dans la suite du document, les parcelles seront nommées selon ces noms de commune. Les parcelles expérimentales mis en place dans ces parcelles sont détaillées au §3.3.2.

6.7.1 2011 : Forville (carotte)

L'essai mis en place sur cette parcelle a testé l'impact d'une réduction du conseil de fertilisation en carotte.

Les carottes ont été semées le 5 mai et ont été récoltées le 30 septembre.

Un prélèvement de sol a été effectué dans la parcelle le 21 mars en vue du conseil de fumure (Tableau 47). Trois niveaux de fertilisation (cf. § 3.3.1) ont été testés :

- 0 UN sur les sous-parcelles 101, 202, 303 et 402 (cf. Figure 4) ;
- 40 UN (conseil calculé selon les nouvelles valeurs de besoins forfaitaires) ont été appliquées sur les sous-parcelles 102, 203, 301 et 403 le 13 mai ;
- 80 UN (conseil calculé selon les anciennes valeurs de besoins forfaitaires) ont été appliquées sur les sous-parcelles 103, 201, 302 et 401 le 13 mai.

Un second prélèvement de sol a été effectué le 30 septembre, après la récolte des carottes (Tableau 47). Ce tableau montre que le reliquat azoté mesuré sur les sous-parcelles correspondant à l'objet 'fumure ancien conseil' se démarque des reliquats azotés mesurés sur les autres sous-parcelles de l'essai. L'analyse statistique confirme une différence significative de reliquat azoté entre l'objet 'fumure ancien conseil' et les deux autres objets ('fumure nouveau conseil' et 'fumure conseil réduite').

Tableau 47. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés dans la parcelle Forville – carotte en 2011

	21/03/2011	30/09/2011		
	autour de l'essai	sur le parcellaire expérimental		
	pour conseil ferti	0 UN	40 UN	80 UN
0-30cm	15	5	8	29
30-60cm	9	7	12	28
60-90cm	5	5	9	16
total	29	17	29	73
Groupe statistique		a		b

La date du prélèvement de sol (30/09) se situant hors de la plage de mesure de l'APL de référence (avant le 15/10), il n'a pas été possible de comparer les reliquats azotés mesurés sur cette parcelle à l'APL de référence 2011.

Les rendements obtenus sur le parcellaire expérimental sont présentés au Tableau 48. On peut voir que le rendement diminue avec la dose d'azote appliquée. Deux groupes statistiques se démarquent pour le rendement : le premier groupe comprend les rendements obtenus avec les objets 'fumure conseil réduite' et 'fumure nouveau conseil' et le second groupe comprend les rendements obtenus avec les objets 'fumure nouveau conseil' et 'fumure ancien conseil'.

Les densités moyennes observées dans cet essai ne sont pas considérées comme significativement différentes par l'analyse statistique : un seul groupe se dégage.

Par ailleurs, on observe une augmentation du poids moyen par carotte avec le niveau de fumure. Deux groupes se dégagent et l'objet 'fumure nouveau conseil' est intermédiaire entre ces deux groupes.

Après le semis des carottes le 5 mai, l'azote a été appliqué sous forme de nitrate le 13 mai. Les conditions sèches du printemps n'ont permis ni la germination des carottes ni la fonte complète de l'engrais. Ces processus n'ont pu être déclenchés qu'avec le retour des précipitations début juin. La probabilité que l'azote libéré à cette période percole et touche un germe de carotte est plus élevée sous l'objet 80 UN que sous l'objet sans azote. La perte de quelques plantules par brûlure lors de la germination des carottes serait une explication possible aux différences de densité observées entre les 3 objets. Bien que ces différences ne soient pas significatives, il y a malgré tout 18 carottes de moins au mètre pour l'objet 80 UN par rapport à l'objet 0 UN. Cette faible densité a donné des carottes plus grosses mais moins nombreuses.

Tableau 48. Rendements et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Forville – carotte en 2011

	0 UN	40 UN	80 UN
rendement moyen (t/ha)	88,25	84,63	80,42
gr. statistique	a		b
densité moyenne (carotte/m)	79	72	61
gr. statistique	a		
poids moyen (g)	69	73	81
gr. statistique	a		b

En conclusion, sur cet essai de fertilisation en carotte, il faut rester très prudent vu les difficultés rencontrées. Néanmoins, il semble que le conseil de 80 UN ('fumure ancien conseil') soit à proscrire car il laisse un reliquat azoté post-récolte nettement supérieur à ceux des fumures 'nouveau conseil' ou 'zéro azote'.

6.7.2 2011 : Berloz (fève des marais – épinard d'automne)

L'essai mis en place sur cette parcelle a testé l'impact d'une réduction du conseil de fertilisation en fève des marais.

Les fèves des marais ont été semées le 18 avril et ont été récoltées le 15 juillet.

Un prélèvement de sol a été effectué dans la parcelle le 1^{er} mars en vue du conseil de fumure (Tableau 49). Trois niveaux de fertilisation (cf. §3.3.1) ont été testés :

- 0 UN sur les sous-parcelles 101, 202, 303 et 402 (cf. Figure 4) ;
- 50 UN (conseil calculé selon les nouvelles valeurs de besoins forfaitaires) ont été appliquées sur les sous-parcelles 102, 203, 301 et 403 le 29 avril ;
- 100 UN (conseil calculé selon les anciennes valeurs de besoins forfaitaires) ont été appliquées sur les sous-parcelles 103, 201, 302 et 401 le 29 avril.

Un second prélèvement de sol a été effectué le 18 juillet, après la récolte des fèves (Tableau 49). Les reliquats azotés post-récolte mesurés sur le parcellaire expérimental étaient assez faibles, quelle que soit la fertilisation appliquée. On peut cependant voir que le reliquat azoté obtenu pour l'objet 'fumure ancien conseil' (100UN) était significativement plus élevé que les deux autres reliquats azotés.

Tableau 49. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés dans la parcelle Berloz – fève des marais en 2011

	01/03/2011	18/07/2011		
	autour de l'essai	sur le parcellaire expérimental		
	pour conseil ferti	0 UN	50 UN	100 UN
0-30cm	6	14	17	24
30-60cm	3	9	10	10
60-90cm	3	8	7	7
total	12	31	34	41
Groupe statistique		a		b

Les rendements et qualité de récolte obtenus sur le parcellaire expérimental sont présentés au Tableau 50. Quelle que soit la fertilisation appliquée, les rendements obtenus sont proches, ce qui est confirmé par l'analyse statistique, étant donné qu'un seul groupe se dégage.

Les différences de tendérométries mesurées sont faibles. L'analyse statistique confirme que les tendérométries mesurées appartiennent au même groupe, ce qui implique qu'elles ne sont pas significativement différentes.

Tableau 50. Rendements et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Berloz en fève des marais en 2011

	0 UN	40 UN	80 UN
rendement moyen (t/ha)	9,39	9,67	9,60
gr. statistique	a		
tendérométrie	118,1	121,6	119,5
gr. statistique	a		

Un épinard d'automne a été semé sur cette parcelle le 26 juillet. Les reliquats azotés et les rendements en épinard ont été suivis sur le parcellaire expérimental afin de mesurer l'impact de la minéralisation des résidus de fève sur l'épinard d'automne en seconde culture.

Un prélèvement de sol a été réalisé sur le parcellaire expérimental le 10 août pour mesurer la quantité d'azote présente dans les 40 premiers centimètres de sol (Tableau 51). Il apparaît que

la quantité d'azote nitrique y était importante, conséquence de la minéralisation des résidus de culture de fève et de l'azote liquide apporté avant le semis, soit 82 UN sur tout le parcellaire. On n'observe cependant pas de différence significative entre les trois objets testés.

Tableau 51. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Berloz en épinards d'automne en 2011

fumure sur fèves :	10/08/2011		
	0 UN	50 UN	100 UN
0-40cm	160	151	146
groupe statistique	a		

L'épinard d'automne a été récolté le 15 septembre. Un prélèvement de sol a été réalisé le même jour, après la récolte de l'épinard (Tableau 52). L'azote présent dans le profil le 10 août a été bien utilisé par l'épinard d'automne ; les reliquats azotés post-récolte sont assez faibles le 15 septembre. Il n'existe pas de différence significative de reliquat azoté post-récolte entre les différents objets de l'essai.

Tableau 52. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Berloz après épinards d'automne en 2011

fumure sur fèves :	15/09/2011		
	0 UN	50 UN	100 UN
fumure sur épinard :	82 UN	82 UN	82 UN
0-30cm	4	5	8
30-60cm	8	15	13
60-90cm	8	11	9
total	20	31	30
groupe statistique	a		

La date du prélèvement de sol (15/09) se situant hors de la plage de mesure de l'APL de référence (avant le 15/10), il n'a pas été possible de comparer les reliquats azotés mesurés sur cette parcelle à l'APL de référence 2011.

Les rendements et qualité de récolte (rapport tige – feuille) sont présentés au Tableau 53. Le rendement en épinard augmente avec le niveau de fertilisation qui avait été appliqué sur la culture précédente de fève des marais, ce qui peut laisser penser que les résidus de culture de fèves ont libéré d'autant plus d'azote nitrique que la fertilisation était élevée. Les épinards ont ensuite "profité" de ce surplus de minéralisation. Les différences de rendements ne sont cependant pas considérées comme significatives par l'analyse statistique.

Les différences observées de rapports tige/feuille ne sont pas non plus considérées comme significatives par l'analyse statistique.

Tableau 53. Rendements et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Berloz en épinard d'automne en 2011

fumure sur fèves :	0 UN	50 UN	100 UN
fumure sur épinard :	82 UN	82 UN	82 UN
rendement moyen (t/ha)	22,48	23,52	24,94
gr. statistique	a		
tige/feuille (%)	16,0	18,9	17,7
gr. statistique	a		

En conclusion, sur cet essai de fertilisation en fève des marais, le conseil de 100 UN ('fumure ancien conseil') était à proscrire puisqu'entraînant une augmentation significative du reliquat azoté post-récolte sans augmentation de rendement. La réduction du conseil par rapport aux valeurs actuelles (passage de 50 UN à 0 UN) s'est justifiée, en ce sens que l'on n'a pas observé de diminution significative de rendement en fève et que les reliquats azotés post-récolte n'étaient pas significativement différents. La sous-fertilisation de l'épinard d'automne a montré que les résidus de culture de fève libèrent d'autant plus d'azote que la fertilisation de la fève est élevée sans pour autant se traduire par des différences significatives de rendement sur l'épinard.

6.7.3 2011 et 2012: Jeneffe (pois + nyger)

L'essai mis en place sur cette parcelle a testé l'impact de l'implantation d'une CIPAN (nyger) après un pois et avant un froment.

La culture de pois a été récoltée le 10 juin. Un nyger a été semé le 29 juillet sur les sous-parcelles SC1, SC2, SC3 et SC4 (cf. Figure 5).

Un prélèvement de sol a été effectué au niveau du parcellaire expérimental le 1^{er} août pour mesurer la quantité d'azote nitrique présente dans le profil au semis du nyger (Tableau 54). L'azote nitrique est principalement localisé dans la couche 0-30cm suite à la minéralisation des résidus de culture de pois. Les quantités d'azote nitrique ne sont pas significativement différentes en fonction des objets qui seront testés (sol nu ou nyger).

Le nyger a été broyé le 20 octobre. Un second prélèvement de sol a été effectué le 19 octobre, juste avant le broyage du nyger (Tableau 54). On observe que les APL diffèrent fortement selon que le sol a été couvert ou non. L'analyse statistique confirme ce constat : la différence d'APL est considérée comme significative. Le nyger s'est bien développé au cours de cet essai et a prélevé 124 kg N-NO₃⁻/ha, laissant un APL moyen avant semis du froment. En revanche, la quantité d'azote nitrique présente dans le sol en l'absence de nyger est particulièrement élevée et principalement localisée dans les couches 0-30cm et 30-60cm, signe que la lixiviation du nitrate est en cours. Cette quantité ne pourra être récupérée que partiellement par le froment qui sera installé par après sur cette parcelle et se retrouvera à terme dans les eaux souterraines.

Tableau 54. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Jeneffe – pois en 2011

	01/08/2011		19/10/2011	
	avant nyger	avant sol nu	après nyger	après sol nu
0-30cm	88	84	38	101
30-60cm	29	29	19	74
60-90cm	10	12	7	13
total	127	125	64	188
gr. statistique	a		a	b

Les APL mesurés sur le parcellaire expérimental ont été comparés à l'APL de référence de 2011 en légumes (classe A7 - Figure 25). L'APL mesuré sur le parcellaire expérimental sans CIPAN après pois est qualifié de mauvais, contrairement à l'APL mesuré sur le parcellaire expérimental avec CIPAN après pois qui est qualifié de satisfaisant.

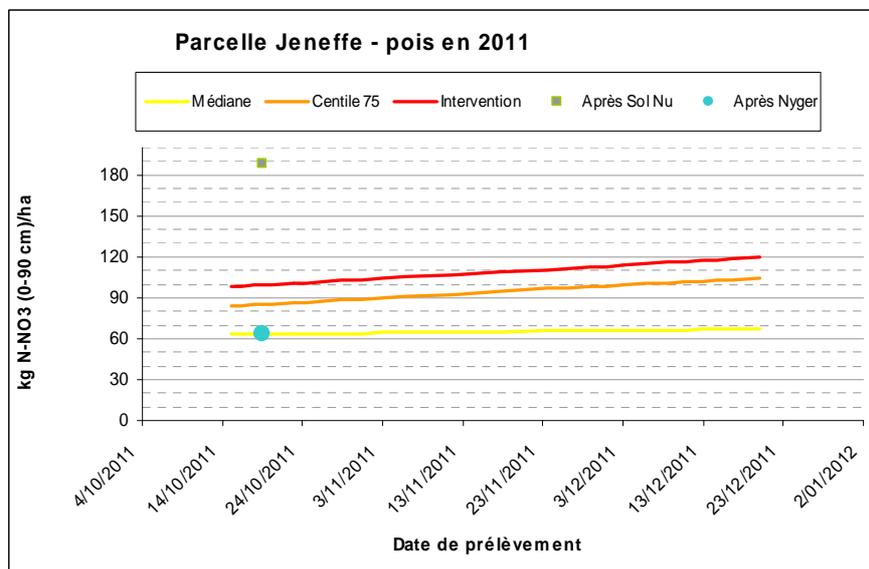


Figure 25. Reliquats azotés mesurés sur le parcellaire expérimental de la parcelle Jeneffe et APL de référence 2011 en légumes

En conclusion, sur cet essai de gestion de l'interculture entre un pois et un froment, la couverture de sol par un nyger s'est révélé être une mesure efficace pour réduire l'APL avant le semis du froment. Le pois est une culture qui se récolte tôt, ce qui laisse le temps d'implanter efficacement une CIPAN. Par contre, si le sol reste nu entre la récolte du pois et le semis du froment, et en cas de conditions favorables à la minéralisation des résidus de pois, la quantité d'azote nitrique qui ne sera récupérable qu'en partie par le froment peut être élevée.

En 2012, l'impact du nyger sur le reliquat azoté et sur le rendement et la qualité du froment a été évalué.

Un prélèvement de sol a été réalisé sur le parcellaire expérimental le 6 mars 2012 pour mesurer le reliquat azoté en sortie d'hiver (Tableau 55). On observe une différence de 27 kg N-NO₃/ha entre les deux objets testés ; cette différence n'est cependant pas statistiquement significative. On voit cependant que le nyger a commencé à restituer l'azote nitrique prélevé

l'année précédente, jouant ainsi son rôle de CIPAN. 170 UN ont ensuite été appliquées sur l'ensemble de la parcelle.

Tableau 55. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés dans la parcelle Jeneffe – froment en 2012 après pois en 2011

	6/3/2012	
	après sol nu	après nyger
0-30cm	10	18
30-60cm	10	26
60-90cm	32	35
total	52	79
Gr. statistique	a	

Pour rappel l'automne 2011 a été exceptionnellement chaud et anormalement sec. Le labour de la parcelle avant le semis de froment a montré un assèchement complet de l'horizon de surface sous le nyger contrairement à celui sous sol nu. L'absence de précipitations en novembre 2011 a donc différé la germination du froment après nyger par rapport au sol nu. Ce retard de développement n'a jamais été comblé. Le froment après sol nu a versé au stade de développement des grains contrairement à celui après nyger qui est resté droit jusqu'à la récolte. Le froment a été récolté le 13 août. L'impact du nyger sur le rendement et la qualité du froment a été évalué (Tableau 56). Ce tableau montre que le seul paramètre qui a été impacté significativement par la présence du nyger est l'indice de Zéleny. On n'observe pas de différence significative pour les autres paramètres (rendement, poids spécifique, taux de protéines).

Tableau 56. Rendement et qualité de la récolte sur le parcellaire expérimental de la parcelle Jeneffe (froment après pois) - 2012

	Sol nu	Nyger
Rendement (15% hum) (kg/ha)	9504	9777
	a	
Poids spécifique (kg/hl)	72,8	73,7
	a	
Protéines (%)	12,9	12,8
	a	
Zéleny (ml)	48,0	52,8
	a	b

En conclusion, le nyger semé sur cette parcelle après la récolte du pois a parfaitement joué son rôle de piège à nitrate avant le semis du froment. Ce nyger n'a pas eu d'impact négatif sur le rendement du froment et a même été favorable à la qualité du grain par l'augmentation de l'indice de Zéleny. Pour autant qu'il soit semé assez tôt, ce couvert peut donc être considéré comme une CIPAN efficace en interculture courte entre un pois et un froment.

6.7.4 2012 : Omal (fève des marais)

L'essai mis en place sur cette parcelle en 2012 a testé l'impact d'une réduction du conseil de fertilisation en fève des marais.

Les fèves ont été semées le 14 mai. Un prélèvement de sol a été effectué dans la parcelle le 5 avril en vue de l'établissement du conseil de fumure (Tableau 57). Le reliquat azoté mesuré sur cette parcelle est faible, justifiant sa sélection pour la mise en place de l'essai. Suite à ce prélèvement, deux niveaux de fertilisation ont été testés :

- 0 UN sur les sous-parcelles 101, 202, 301 et 402 (Figure 6) ;
- 49 UN (conseil calculé selon la valeur de besoin forfaitaire de 70 UN) sur les sous-parcelles 102, 201, 302 et 401 appliquées le 21 mai.

Les fèves ont été récoltées le 10 août et un prélèvement de sol a été effectué à cette date pour mesurer le reliquat azoté post-récolte (Tableau 57). Les reliquats azotés post-récolte étaient faibles et la différence entre les deux niveaux de fertilisation n'était pas significative.

Tableau 57. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés dans la parcelle Omal – fève des marais en 2012

	5/4/2012	10/8/2012	
	Parcelle	Parcelle expérimental	
	Pour conseil ferti	0 UN	49 UN
0-30cm	9	7	8
30-60cm	4	7	9
60-90cm	1	5	8
total	14	19	25
	Gr. statistique	a	

Les rendements et la qualité de récolte obtenus sur le parcellaire expérimental sont présentés au Tableau 58. Une différence non-significative de 0,25 t/ha se marque entre les rendements obtenus avec les deux niveaux de fertilisation. La différence de tendérométrie n'est pas non plus significative.

Tableau 58. Rendement et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Omal (fève des marais) en 2012

	0 UN	49 UN
Rendement moyen (t/ha)	8,53	8,78
Gr. statistique	a	
tendérométrie	119,5	119,0
Gr. statistique	a	

Il apparaît donc que la réduction du conseil de fertilisation en fève des marais était possible sur cette parcelle en 2012 ; une telle conclusion avait déjà été mise en évidence dans l'essai mis en place en 2011 sur la parcelle 'Berloz' (cf. §6.7.2).

En conclusion, pour la deuxième année consécutive sur un essai en fève des marais, la réduction du conseil de fertilisation de 50 UN s'est justifiée, en ce sens que l'on n'a pas observé de réduction significative du rendement en fève et que les reliquats azotés post-récolte n'étaient pas significativement différents. Il faut cependant rester prudent car, bien que non significatives, les différences (0,25 t/ha sur la parcelle Omal en 2012 et 0,28 t/ha sur la parcelle Berloz en 2011) sont toutes en faveur de l'objet 'fumure conseil'.

6.7.5 2012 : Tourinne (carotte)

L'essai mis en place sur cette parcelle en 2012 avait pour objectif d'étudier la réponse d'une culture de carotte à une réduction du conseil de fertilisation azotée. Cet essai visait également à tester l'impact de l'apport d'azote en cours de culture, plutôt qu'au semis.

Les carottes ont été semées le 13 avril. Un prélèvement de sol a été effectué dans la parcelle le 29 mars en vue de l'établissement du conseil de fumure (Tableau 59). Un second prélèvement de sol a été effectué le 9 juillet, en cours de culture, sur quatre sous-parcelles de l'essai. Au final, quatre objets ont été testés sur cette parcelle :

- 0 UN sur les sous-parcelles 101, 202, 303 et 404 (Figure 7) (objet '0 UN');
- 45 UN (conseil calculé sur base du prélèvement de sol réalisé le 29 mars) sur les sous-parcelles 102, 203, 304 et 401 appliquées le 18 avril (objet '45 UN');
- 45 UN (conseil calculé sur base du prélèvement de sol réalisé le 29 mars) sur les sous-parcelles 103, 204, 301, 402 appliquées le 13 juillet (objet '45 UN_(j)');)
- 27 UN (conseil calculé sur base du prélèvement de sol réalisé le 9 juillet) sur les sous-parcelles 104, 201, 302, 403 appliquées le 13 juillet (objet '27 UN_(j)').

Les carottes ont été récoltées le 17 octobre et un prélèvement de sol a été effectué à cette date pour mesurer le reliquat azoté post-récolte (Tableau 59). Les reliquats azotés post-récolte étaient extrêmement faibles et les faibles différences entre les objets testés n'étaient pas significatives.

Tableau 59. Reliquats azotés (kg N-NO₃/ha) mesurés dans la parcelle Tourinne – carotte en 2012

	29/3/2012	9/7/2012	17/10/2012			
	Parcelle	4 sous-parcelles de l'essai	Essai			
	Pour conseil ferti	Pour conseil ferti	0 UN	45 UN	45 UN _(j)	27 UN _(j)
0-30cm	19	11	2	2	2	2
30-60cm	13	24	1	1	1	1
60-90cm	4	-	0	1	1	0
total	36	35	3	4	4	3
		Gr. statistique	a			

Les rendements et la qualité de récolte obtenus sur le parcellaire expérimental sont présentés au Tableau 60. Deux groupes statistiques se démarquent au niveau du rendement : le premier groupe (a) comprend les objets 0 UN, 45 UN_(j) et 27 UN_(j) et le second groupe (b) comprend les objets 45 UN, 45 UN_(j), 27 UN_(j). Cela signifie que la réduction du conseil de fertilisation (0 UN) a engendré un rendement significativement plus faible que celui obtenu avec le conseil apporté au semis (45 UN). Les deux objets correspondant à l'apport d'engrais azoté en cours de culture (45 UN_(j) et 27 UN_(j)) ont engendré des rendements intermédiaires.

Par contre, l'analyse statistique n'a pas révélé de différence significative de densité moyenne et de poids moyen en fonction des différents objets testés.

Tableau 60. Rendement et qualité de récolte obtenus sur la parcelle Tourinne (carotte) en 2012

	0 UN	45 UN	45 UN_(i)	27 UN_(i)
Rendement moyen (t/ha)	110,96	120,24	117,43	116,90
Gr. statistique	a	b	ab	ab
Densité moyenne (car./m)	29,4	29,5	29,3	30,9
Gr. statistique	a			
Poids moyen (g)	226	246	241	229
Gr. statistique	a			

En conclusion, sur cet essai en carotte, la réduction du conseil de fertilisation était à proscrire, car entraînant une réduction significative du rendement sans différence significative de reliquat azoté post-récolte. L'apport d'engrais azoté en cours de culture s'est montré moins efficient que celui au semis. Cet apport était probablement tardif.

7 Bilan financier

Un des objectifs du projet était d'évaluer de manière chiffrée les impacts technico-économiques des modifications apportées aux pratiques culturales de l'agriculteur. Pour cela, les différentes sous-parcelles des essais ont été récoltées séparément, en vue de la quantification individuelle de leur rendement. Il a ainsi été possible de mettre en balance le bénéfice environnemental des différents scénarios testés avec l'impact économique de ces mêmes scénarios.

Les bilans financiers des essais menés depuis 2010 sont détaillés dans les paragraphes ci-dessous. Ceux-ci présentent les résultats des essais en termes de rendement par rapport à la fertilisation azotée et la différence financière entre les deux niveaux de fumure (exprimée en €/ha). Cette différence est calculée à partir du chiffre d'affaires (C.A. = prix brut payé par l'industrie duquel il faut soustraire les coûts de production) et du coût de la fertilisation azotée.

Le chiffre d'affaires pour les cultures légumières a été calculé sur base des contrats passés entre les agriculteurs et la s.a. Hesbayefrost. Pour des questions de confidentialité, seul le chiffre d'affaires est repris sans le détail du calcul. Il faut toutefois noter qu'en fonction de la culture, les prix sont liés à la qualité et à la quantité produite. La qualité est classée par catégories avec un prix pour chacune d'entre elles. La quantité produite est plafonnée et au-delà de ce plafond le prix est nettement moindre. C'est pourquoi, un rendement supérieur ne donne pas forcément un chiffre d'affaires supérieur car la production peut alors être classée dans une catégorie de qualité inférieure à un prix plus faible.

7.1 Bilan financier des essais en 2010

Le Tableau 61 reprend les résultats des essais 2010 en termes de rendement par rapport à la fertilisation azotée et la différence financière entre les deux niveaux de fumure (exprimée en €/ha).

Le coût de la fertilisation azotée a été calculé sur base de coûts standards en 2010, à savoir :

- 0,56 €/kg d'azote liquide ;
- 0,69 €/kg d'azote sous forme solide (nitrate d'ammonium);
- 12 €/ha pour le coût d'épandage.

Les chiffres financiers du Tableau 61 sont repris à titre indicatif. Ils n'ont pas fait l'objet d'une analyse statistique. Le coût de l'azote est lié au prix de l'énergie et est donc très variable d'une année à l'autre. Les prix des légumes sous contrat sont revus chaque année et sont indirectement liés au prix des productions agricoles de base comme les céréales. Il est donc difficile de comparer des résultats d'essais sur le plan financier d'une année à l'autre même si sur le plan agronomique ces résultats sont semblables.

Tableau 61. Résultats des essais 2010 en termes de rendement et de bilan financier (€/ha)

Parcelle	Culture	Résultats 2010				Financier 2010				
		Fumure réduite		Fumure normale		Fumure réduite (FR)		Fumure normale (FN)		Différence (FN - FR)*
		Fumure	Rendement	Fumure	Rendement	C.A.	Coût Fert. Az.	C.A.	Coût Fert. Az.	
P1	Pois	pas d'essai - fumure de 0 UN								
	Haricot	pas d'essai - fumure de 0 UN								
P2	Poireau	0 UN	61,0 T/ha	50 UN	59,1 T/ha	24 777 €	0 €	23 999 €	47 €	-825 €
P3	Betterave	0 UN	18,69 T/ha	61 UN	17,69 T/ha	3 505 €	0 €	3 317 €	54 €	-242 €
P4	Fève des marais	0 UN	10790 kg/ha	26 UN	10673 kg/ha	3 210 €	0 €	3 333 €	30 €	93 €
	Epinard	70 UN	33,15 T/ha	110 UN	36,30 T/ha	2 092 €	60 €	1 960 €	88 €	-160 €
P5	Froment	pas d'essai								
P6	Betterave	0 UN	13,33 T/ha	78 UN	14,11 T/ha	2 500 €	0 €	2 645 €	66 €	79 €

* Une valeur négative indique un gain financier sur les sous-parcelles "fumure conseil réduite" par rapport aux sous-parcelles "fumure conseil"

On voit dans le Tableau 61 que sur les cinq essais mis en place à l'aplomb des lysimètres en 2010, deux se sont révélés être plus rentables d'un point de vue financier avec l'application de la fumure conseil plutôt que la fumure conseil réduite. Ces deux essais concernent :

- la fève des marais sur la parcelle PL3 : le gain (non significatif) de rendement sur les sous-parcelles « fumure conseil réduite » est compensé par le passage dans une catégorie de qualité inférieure. L'application de la fumure « conseil » aura permis à l'agriculteur d'obtenir un surplus de 93€/ha par rapport à la « fumure conseil réduite »;
- la betterave sur la parcelle Haute Bova : le gain (non significatif) de rendement sur les sous-parcelles où a été appliquée la fumure « conseil » aura permis à l'agriculteur d'obtenir un surplus de 79€/ha par rapport à la « fumure conseil réduite »;

Sur les trois autres essais mis en place en 2010, l'application de la fumure réduite a permis à l'agriculteur de toucher un surplus financier ; ces différences sont assez marquées, notamment en poireau sur la parcelle Gros Thier Bovenistier, où on observe une différence de 825€/ha en faveur des sous-parcelles « fumure conseil réduite ».

On voit donc que si les différences de rendements observées sur les essais n'étaient pas significatives, les réductions de fertilisation ont permis d'obtenir, sur une majorité de parcelles, des gains financiers parfois importants.

7.2 Bilan financier des essais en 2011

7.2.1 Impact de la réduction de fertilisation azotée

Les Tableau 62 et Tableau 63 reprennent les résultats des essais en termes de rendement par rapport à la fertilisation azotée et la différence financière entre les deux ou trois niveaux de fumure.

Le coût de la fertilisation azotée a été calculé sur base de coûts standards en 2011, à savoir :

- 0,88 €/kg d'azote liquide ;
- 1,06 €/kg d'azote sous forme solide (nitrate d'ammonium);
- 15 €/ha pour le coût d'épandage.

Tableau 62. Résultats des essais sur sites lysimétriques en 2011 en termes de rendement et de bilan financier (€/ha)

Parcelle	Culture	Résultats 2011				Financier 2011				Différence (FC - FR)
		Fumure réduite		Fumure conseillée		Fumure réduite (FR)		Fumure conseillée (FC)		
		Fumure	Rendement	Fumure	Rendement	C.A.	Coût Fert. Az.	C.A.	Coût Fert. Az.	
P1	Froment	pas d'essai								
P2	Froment	pas d'essai								
P3	Pépinière	pas d'essai								
P4	Pomme de terre	pas d'essai								
P5	Haricot	0 UN	10,58 T/ha	37 UN	9,32 T/ha	2.050 €	0 €	1.805 €	48 €	-293 €
P6	Froment	pas d'essai								

Tableau 63. Résultats des essais hors sites lysimétriques en 2011 en termes de rendement et de bilan financier (€/ha)

Parcelle	Culture	Résultats 2011						Financier 2011							
		Fumure réduite		Fumure conseillée		Fumure conseil 09		Fumure réduite (FR)		Fumure conseillée (FC)		Fumure conseil 09 (F09)		Différence (FC - FR)	Différence (F09 - FC)
		Fumure	Rendement	Fumure	Rendement	Fumure	Rendement	C.A.	Coût Fert. Az.	C.A.	Coût Fert. Az.	C.A.	Coût Fert. Az.		
P1	Fève des marais	0 UN	9389 kg/ha	50 UN	9673 kg/ha	100 UN	9598 kg/ha	3.590 €	0 €	3.551 €	59 €	3.612 €	103 €	-98 €	17 €
	Epinard	82 UN	22,48 T/ha	82 UN	23,52 T/ha	82 UN	24,94 T/ha	1.463 €	87 €	1.420 €	87 €	1.572 €	87 €	-43 €	152 €
P2	Carotte	0 UN	88,25 T/ha	40 UN	84,63 T/ha	80 UN	80,42 T/ha	4.413 €	0 €	4.231 €	50 €	4.021 €	85 €	-232 €	-245 €

*une valeur négative dans les deux dernières colonnes indique un gain financier sur les sous-parcelles où la fumure était réduite

Sur les parcelles équipées d'un lysimètre, seule une parcelle de haricot a fait l'objet d'un essai de fertilisation. Il apparaît que cet essai était plus rentable d'un point de vue financier avec la réduction du conseil de fertilisation. Ceci s'explique par un chiffre d'affaire supérieur (en raison du rendement supérieur) combiné à des coûts de fertilisation moindres.

Sur les parcelles hors sites lysimétriques, une parcelle a fait l'objet d'un essai de fertilisation en fève des marais (suivie d'un épinard d'automne). Pour la culture de fève des marais, la fumure la plus "rentable" était la réduction du conseil de fumure, avec un chiffre d'affaire élevé et un coût de fertilisation nul. L'impact de la fertilisation croissante en fève des marais s'est par contre fait ressentir positivement sur le chiffre d'affaire en épinard, en raison du rendement supérieur obtenu grâce à la minéralisation des résidus de culture de fèves (la fertilisation en épinard étant identique sur l'ensemble du parcellaire).

Enfin, pour l'essai en carotte, l'analyse financière montre qu'en raison des différences marquées de rendements entre les objets (cf. §6.7.1), c'est la réduction du conseil de fumure qui s'est révélée la plus "rentable".

7.2.2 Coût de l'implantation de CIPAN

On a pu voir sur les essais en 2011 que la gestion de l'interculture, et plus particulièrement l'implantation de CIPAN en interculture courte ou longue, pouvait avoir un impact positif en termes de réduction des flux azotés vers les eaux souterraines.

L'objectif de ce paragraphe est d'estimer les coûts d'implantation d'une CIPAN qui peuvent fortement varier en fonction du matériel utilisé, de la technique de semis, de l'espèce semée, de la technique de destruction,....

Il existe par ailleurs une série de bénéfices liés à l'implantation d'une CIPAN qui sont difficilement chiffrables :

- lutte contre l'érosion des terres agricoles ;
- amélioration de la structure du sol ;
- production d'humus ;
- production de fourrage ;
- ...

Trois types de coûts ont été pris en compte dans cette analyse pour tenir compte de l'impact financier des CIPAN :

- coûts liés au semis des CIPAN ;
- coût des semences ;
- coûts liés à la destruction des CIPAN.

Le coût de semis est estimé à 30€/ha (Chambre d'Agriculture Rhône-Alpes¹⁰ ; Deneufbourg et al, 2010). Le coût du déchaumage éventuel avant semis des CIPAN n'est pas pris en compte.

Le coût des semences est estimé à partir des valeurs renseignées par de Toffoli et al (2010) sur base d'essais menés sur la production fourragère d'un certain nombre de CIPAN.

Les coûts de destruction (broyage, labour) des CIPAN sont estimés à partir des valeurs renseignées par Nitrawal (2007) dans le classeur Eau – Nitrate, par le producteur de semences SEM-Partners¹¹ et par la Chambre d'Agriculture Rhône-Alpes¹⁰. Au final, le coût du broyage est estimé à 25 €/ha et le coût du labour à 40€/ha.

Le Tableau 64 synthétise les coûts estimés d'implantation des CIPAN sur les essais menés en 2011. On peut voir que le coût d'implantation est estimé de 70€/ha à 135€/ha en fonction du type de CIPAN. La moutarde est la CIPAN dont le coût d'implantation est le plus faible, avec 70 €/ha. Ce chiffre est tout à fait conforme à celui cité par Hérivaux et al (2005) pour une culture de moutarde (67€/ha). En raison du coût des semences un peu plus élevé, l'implantation d'un nyger se révèle un peu plus coûteuse. Enfin, on peut voir que l'implantation d'une légumineuse, même en mélange, est sensiblement plus coûteuse, en raison principalement du coût des semences.

¹⁰ http://www.rhone-alpes.chambagri.fr/phytov3/pages/interculture_CIPAN.htm

¹¹ <http://www.sem-partners.com/doc/couv.pdf>

Tableau 64. Impact financier estimé de l'implantation des CIPAN sur les essais 2011

Parcelle	Culture	CIPAN	coût d'implantation	€/ha		coût total d'implantation de la CIPAN
				coût des semences	coût de destruction	
GP Chemin de Fer	Pomme de terre	Moutarde	30	15	25	70
GT Bovenistier	Haricot	Moutarde	30	15	25	70
PL1	Froment	Trèfle + Avoine	30	65	40	135
		Trèfle	30	60	40	130
PL3	Froment	Avoine	30	36	40	106
		Vesce + Avoine	30	58	40	128
Jeneffe	Pois	Nyger	30	25	25	80

7.3 Bilan financier des essais en 2012

Le Tableau 65 reprend les résultats financiers des essais en froment après une interculture courte. Il tient compte du chiffre d'affaires (C.A.) et du coût supplémentaire lié à l'implantation d'une CIPAN par rapport à une situation de sol nu. Les coûts d'implantation des CIPAN sont repris du §7.2.2. La différence financière dans la situation de sol nu en interculture après pomme de terre est de 145 €/ha. Cette différence est nettement plus faible dans la situation de sol nu en interculture après pois où elle se chiffre à 15 €/ha. Il ne faut pas tirer de conclusion trop rapidement car aucune différence de gestion de la fumure azotée n'a été adoptée alors que les profils azotés en sortie d'hiver affichaient des différences.

Tableau 65. Résultats financiers des essais en froment après une interculture courte

Parcelle	Précédent	Résultats 2012			Financier 2012			Différence (SN - IC)
		Interculture		Sol nu	Interculture (IC)		Sol nu (SN)	
		Type	Rendement	Rendement	C.A.	Coût	C.A.	
GP Chemin de fer	Pomme de terre	Moutarde	7735 kg/ha	8047 kg/ha	1.856 €	70 €	1.931 €	145 €
Jeneffe	Pois	Nyger	9777 kg/ha	9504 kg/ha	2.346 €	80 €	2.281 €	15 €

Le Tableau 66 reprend les résultats des essais en termes de rendement par rapport à la fertilisation azotée et la différence financière entre les deux niveaux de fumure.

Le coût de la fertilisation azotée a été calculé sur base de coûts standards en 2012, à savoir :

- 0,83 €/kg d'azote sous forme liquide ;
- 1,04 €/kg d'azote sous forme solide (nitrate d'ammonium);
- 16 €/ha pour le coût d'épandage.

Tableau 66. Résultats financiers des essais en légumes hors sites lysimétriques

Parcelle	Culture	Résultats 2012				Financier 2012			FC - FR
		Fumure réduite (FR)		Fumure conseillée (FC)		(FR)	(FC)		
		Fumure	Rendement	Fumure	Rendement	C.A.	C.A.	Coût	
Omali	Fève des marais	0 UN	8532 kg/ha	49 UN	8784 kg/ha	3.415 €	3.480 €	57 €	8 €
Tourinne	Carotte	0 UN	110,96 T/ha	45 UN	120,24 T/ha	4.255 €	4.463 €	53 €	155 €

En fève des marais, la différence financière n'est que de 8 €/ha en faveur de l'objet 'fumure conseil'. Les carottes avec la fumure conseillée ont obtenu un rendement significativement supérieur à celles produites avec une fumure 'zéro azote'. Il est donc normal d'obtenir une différence financière de 155 €/ha en faveur de l'objet 'fumure conseil'.

7.4 Bilan financier de l'essai en 2013

Le Tableau 67 reprend les résultats financiers des essais en froment après une interculture courte. Il tient compte du chiffre d'affaires (C.A.) et du coût supplémentaire lié à l'implantation d'une CIPAN par rapport à une situation de sol nu. Les coûts d'implantation des CIPAN sont repris du §7.2.2. La différence est favorable à la situation en sol nu par rapport à l'implantation d'un nyger (+ 110 €/ha) et d'une moutarde (+ 80€/ha), en raison d'un rendement plus élevé et de l'absence de coûts d'implantation de CIPAN. L'implantation d'une moutarde était plus rentable que l'implantation d'un nyger (+ 30 €/ha). Il ne faut cependant pas tirer de conclusion trop rapidement car aucune différence de gestion de la fumure azotée n'a été adoptée alors que les profils azotés en sortie d'hiver affichaient des différences.

Tableau 67. Résultats financiers de l'essai en froment après une interculture courte

Parcelle	Précéd.	Résultats 2013					Financier 2013						
		Interculture				Sol nu	Nyger (Ny)		Moutarde (Mo)		Sol nu (SN)	Différence (SN - Ny)	Différence (SN - Mo)
		type	rendement	type	rendement	rendement	C.A.	Coût	C.A.	Coût	C.A.		
Haute Bova	Pois	nyger	11441 kg/ha	moutarde	11525 kg/ha	11566 kg/ha	2.746 €	80 €	2.766 €	70 €	2.776 €	110 €	80 €

8 Contribution de la S.A. Hesbaye Frost

En 2010 et 2011, la S.A. Hesbaye Frost a financé et mis en place des essais dans le but d'approfondir certaines problématiques relatives à la gestion de l'azote en cultures industrielles légumières. L'objectif et les enseignements de ces essais sont brièvement présentés ci-dessous. Les protocoles complets sont détaillés dans les rapports intermédiaires de cette étude (Deneufbourg et al., 2011 ; Deneufbourg et al., 2012).

8.1 Essais de fertilisation en épinard d'hiver (2010 et 2011)

La fertilisation azotée de l'épinard d'hiver est assez délicate car les premiers apports sont effectués en février alors que le sol est encore très froid. L'azote est apporté sous forme de nitrate d'ammoniaque c'est-à-dire 50 % d'azote nitrique disponible immédiatement et 50 % d'azote ammoniacal disponible après nitrification. En sol humide à une température de 5° C, le temps de nitrification de l'azote ammoniacal est de l'ordre de 20 jours. On comprend aisément qu'un apport réduit en 1^{ère} application puisse engendrer une faim d'azote de l'épinard, ou encore qu'un apport tardif puisse ne pas être pleinement utilisé par l'épinard.

La dose, la période d'application et le fractionnement de la fumure azotée sont des paramètres importants qui conditionnent certainement le rendement et la qualité de l'épinard mais également le niveau des reliquats azotés en post-récolte voire l'APL en fin de saison après la culture du haricot. Pour tenter d'y voir plus clair dans le cadre de cette problématique, une expérimentation a été mise en place en 2010.

Au terme de cette expérimentation, il semble qu'une part importante du conseil de fumure doive être apportée tôt à la sortie de l'hiver à la reprise de la végétation. Néanmoins le fractionnement reste indispensable pour éviter les phénomènes de brûlure. Les 2 fractions peuvent être appliquées à 15 jours d'intervalle pour les épinards récoltés tôt.

Pour les épinards plus tardifs, une expérimentation a été mise en place en 2011 pour tester si ce fractionnement rapproché se justifie toujours ou s'il peut être espacé. L'évolution de la minéralisation de l'azote apporté a également été suivie par des mesures régulières de reliquats azotés sur sol nu.

Dans les conditions de l'essai (fin d'hiver et début de printemps particulièrement secs, irrigation tardive qui a privé l'épinard de bonnes conditions de croissance pendant deux semaines), sans le fractionnement que la date d'application n'ont pu montrer leur influence.

8.2 Suivi APL en culture de haricot (2010)

Avant même la mise en place du système de contrôle des APL, des mesures de reliquats azotés en post-récolte avaient été réalisées de manière systématique sur toutes les parcelles de haricot suivies en 2001 et 2002. Il apparaît que la baisse du niveau de ces reliquats azotés post-récolte passe d'abord par une bonne maîtrise de la fertilisation du haricot ou de l'épinard qui le précède. Cependant, un niveau de reliquats azotés de post-récolte en culture de haricot de l'ordre de 60 kg N-NO₃/ha ne veut pas dire que l'APL sera acceptable. Comme pour toute légumineuse, la minéralisation des résidus de culture du haricot peut libérer beaucoup d'azote et une bonne gestion de l'interculture est donc nécessaire pour éviter une augmentation trop importante de l'APL.

Soucieux de ce problème d'APL après une culture de haricot, un suivi de 3 parcelles a été effectué en 2010. Des mesures de reliquats azotés en post-récolte ont été réalisées ainsi que la collecte des données culturales susceptibles d'influencer le niveau des APL.

8.3 Suivi de la minéralisation de l'azote en épinard de printemps (2011)

Comme dans l'essai de fertilisation en épinard d'hiver, il est intéressant de suivre la minéralisation de l'azote en épinard de printemps par des prélèvements tous les 15 jours.

Nombreux sont les agriculteurs travaillant à l'azote liquide. Comment cet azote évolue-t-il dans le sol et quand est-il réellement disponible pour l'épinard ? Telles étaient les questions auxquelles cet essai visait à répondre.

Au terme de cette expérimentation, il semble que même l'incorporation de l'azote liquide ne soit pas suffisante pour garantir sa disponibilité pour l'épinard. L'humidité du sol est certainement un paramètre important dans le processus de minéralisation de la fraction uréique de l'azote liquide. En cas de conditions sèches, le recours à l'irrigation avant la pleine croissance de l'épinard est peut-être à envisager.

8.4 Suivi APL en culture de haricot (2011)

Dans la continuité de celui effectué en 2010, un suivi APL après culture de haricot a été effectué dans 10 parcelles en 2011. Des mesures d'APL ont été réalisées ainsi que la collecte des données culturales susceptibles d'influencer le niveau des APL.

Au terme de ce suivi, on constate que les APL les plus élevés correspondent aux récoltes les plus tardives. La date de récolte est dictée par l'industrie en fonction du planning de récolte de toutes les parcelles en haricot. Pour les récoltes avant le 15 septembre, seule une parcelle non semée d'une CIPAN ou d'un froment a un APL dépassant le seuil d'intervention. Pour les récoltes après le 15 septembre, le semis d'une CIPAN ou d'un froment a un effet "piège à nitrate" nettement moins important. Sur les six parcelles concernées, trois ont un APL supérieur au seuil d'intervention. Dans le cas de récolte tardive du haricot, les bonnes pratiques agricoles de l'agriculteur ont finalement peu d'influence sur l'APL.

9 Vulgarisation du retour d'expérience

Un des trois axes de la convention est la vulgarisation des enseignements de la recherche. L'objectif principal de cet axe est la sensibilisation des producteurs de légumes wallons, et surtout du milieu de l'industrie légumière, aux enjeux de la problématique nitrate. Un autre objectif est la poursuite et le renforcement de l'information de l'existence en Wallonie d'une plate-forme d'essais permettant l'utilisation d'outils lysimétriques et la diffusion des résultats et enseignements des expérimentations menées sur la fertilisation et les itinéraires culturaux en cultures légumières.

Concrètement, les actions suivantes étaient prévues par la convention.

- Organisation de visites de terrain
- Organisation d'une conférence pour présenter et réfléchir aux conclusions du projet
- Diffusion dans la presse d'un article de synthèse

9.1 Organisation de visites de terrain

Le fonctionnement d'un lysimètre a été présenté le 25 septembre 2011 lors d'une action de communication (plate-forme de démonstration sous forme de labyrinthe) organisée par la Structure d'encadrement Nitrawal à Malèves-Sainte-Marie, dans le but d'illustrer le travail des membres scientifiques de cette structure d'encadrement.

Une fosse a été creusée dans le sol et une maquette (à échelle légèrement réduite) d'un lysimètre a été réalisée et placée dans la fosse afin d'illustrer son fonctionnement (Photo 4). Un poster a également été réalisé pour schématiser le fonctionnement global d'un lysimètre. Cette journée, destinée au grand public, a rencontré un grand succès (plus de 800 visiteurs).



Photo 4. Maquette d'un lysimètre

Une action de communication similaire a été organisée le 25 août 2013 dans le cadre des fêtes de la moisson à l'Abbaye de Bonne-Espérance ; le fonctionnement d'un lysimètre y a de

nouveau été présenté. De l'ordre de 750 visiteurs ont été recensés dans le labyrinthe lors de cette journée.

La maquette du lysimètre sera de nouveau exposée dans le cadre d'une plate-forme de démonstration à Cérroux-Mousty du 10 au 13 octobre 2013.

9.2 Organisation d'une conférence de restitution des enseignements de l'étude

Une conférence de restitution des enseignements et conclusions de l'étude a été organisée le 9 février 2012 au Château de Jehay (Amay). L'intitulé complet de cette conférence était : « légume industriel, APL et bonne qualité des eaux souterraines : compatibles ? ».

La conférence ciblait principalement les producteurs de légumes. Pour cela, une invitation personnelle (cf. Annexe 1) a été envoyée à chaque producteur de légumes membre d'APLIGEER (coopérative produisant des légumes pour Hesbaye Frost). Une invitation personnelle a également été envoyée aux administrations et institutions concernées. La conférence a été annoncée dans la presse spécialisée (Sillon Belge et Plein Champ) sous forme de communiqué dans la rubrique agenda et d'article de synthèse invitant le lecteur à assister à la conférence pour prendre connaissance de l'ensemble des résultats (cf. §9.3).

Au cours de cette conférence, cinq exposés ont été présentés :

- Directive Nitrate : PGDA, APL de référence et contrôles APL
- Technique lysimétrique : outil de contrôle de l'adéquation APL et qualité de l'eau
- Moyens d'action pour améliorer la qualité de l'eau : fertilisation des cultures
- Moyens d'action pour améliorer la qualité de l'eau : gestion de l'interculture
- Moyens d'action pour améliorer la qualité de l'eau : rotations des cultures

Une attention particulière a été apportée à présenter les résultats de l'étude ainsi que des pistes d'amélioration des pratiques. Une séance de questions-réponses a également permis aux personnes présentes de poser leurs questions ou d'exprimer leur avis sur l'étude et ses conclusions.

Une quarantaine de personnes étaient présentes à cette conférence, dont une bonne moitié d'agriculteurs. L'industrie légumière (Hesbaye Frost s.a.) y était également représentée.

9.3 Diffusion dans la presse spécialisée d'un article de synthèse

En guise d'invitation à la conférence du 9 février 2012 (cf. §9.2), un article de synthèse est paru dans le Plein Champ du 2 février 2012 (Annexe 2) et dans le Sillon Belge du 3 février 2012 (Annexe 3).

Cet article a brièvement présenté le contexte et les objectifs de l'étude, les sites retenus pour installer les lysimètres et le système lysimétrique mis en place. Il a volontairement été décidé de ne dévoiler dans cet article que les grandes lignes des résultats de l'étude afin de susciter l'intérêt du lecteur à participer à la conférence du 9 février 2012 pour prendre connaissance de l'ensemble des résultats et enseignements du projet.

10 Contamination de l'eau par les produits phytosanitaires

10.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, le bon fonctionnement hydraulique des lysimètres a permis d'évaluer l'impact de l'agriculture (fertilisation, succession culturale, interculture) sur les flux de nitrate vers les aquifères.

L'agriculture a recours aux produits phytosanitaires pour protéger les cultures des adventices, des ravageurs et d'autres maladies susceptibles d'affecter la récolte tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif.

L'utilisation de ces produits a parfois causé une dégradation de la qualité des eaux souterraines au cours de ces dernières décennies. L'impact de cette dégradation est, pour la production d'eau potable, nettement plus dommageable que la contamination par le nitrate. D'une part, parce que le nitrate n'existe que sous une seule forme : NO_3^- alors que les produits phytosanitaires sont multiples (en ce compris les produits de dégradation) et variés en terme de comportement physico-chimique. D'autre part, les seuils de non potabilité sont très différents : alors que le nitrate affiche un 'plafond' de 50 mg/l, un produit phytosanitaire ne peut être présent seul à plus de 100 ng/l, soit une concentration 500.000 fois moindre. La potabilisation d'une eau contaminée par des produits phytosanitaires est ainsi logiquement nettement plus coûteuse que dans le cas du nitrate.

Le Tableau de bord 2010 de l'Etat de l'Environnement wallon¹² a mis en évidence que dans plus de 60% des sites de contrôle de la qualité des eaux souterraines, des pesticides sont détectés (Figure 26). La plupart du temps, ces pesticides ne sont plus utilisés en agriculture (atrazine, ...) ou leur usage est réduit (bentazone, ...). Par ailleurs, de nouveaux pesticides (tels que le métolachlore, le carbendazime) apparaissent dans les eaux souterraines.

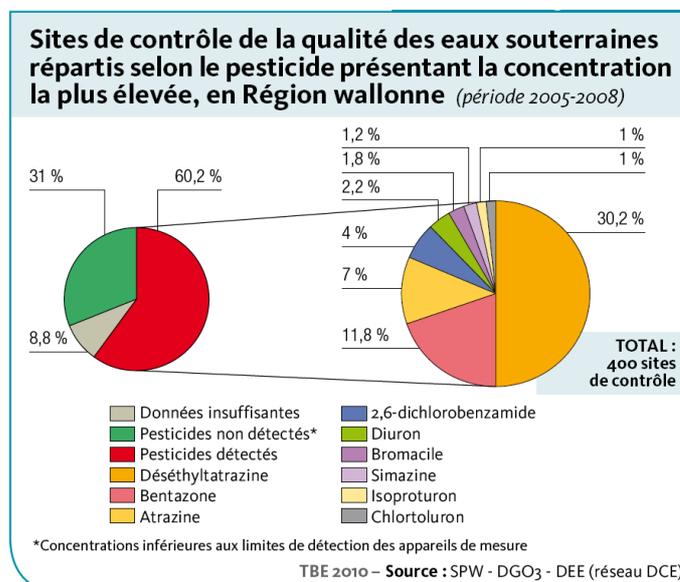


Figure 26. Classement des sites de contrôle de la qualité des eaux souterraines en fonction des pesticides en Région wallonne

¹² <http://etat.environnement.wallonie.be/index.php?page=le-tableau-de-bord-2010>

Tout comme le nitrate dans les nappes profondes, dès qu'un pesticide apparaît, il faut souvent plusieurs décennies pour inverser la tendance.

D'autre part, la contamination de notre environnement par ces produits n'est pas due au seul fait de les pulvériser sur les champs ; des contaminations locales (lors du rinçage des pulvérisateurs à la ferme) ou causées par d'autres secteurs (domestique, administration, ...) contribuent également à la dégradation de la qualité des eaux.

Pour pouvoir cibler plus efficacement les actions à entreprendre, il est nécessaire de disposer d'observations dans chacun de ces 'compartiments'.

Dans ce contexte, il apparaît judicieux d'évaluer le potentiel des lysimètres en tant qu'observatoire de flux de produits phytosanitaires en plein champ afin de contribuer à la prévention de la contamination des eaux souterraines par ces produits.

10.2 Suivi de la percolation des produits phytosanitaires à partir d'échantillons composites

De l'automne 2011 à l'été 2013, à chaque visite des lysimètres, un échantillon d'eau a été prélevé, conditionné dans un flacon en verre (250 ml ou 500 ml selon le volume d'eau percolé) et congelé. Lors de ces visites, le volume d'eau percolé a été enregistré pour pouvoir reconstituer un composite représentatif de la saison de percolation.

Après décongélation en frigo, six composites ont été constitués et confiés à la Société Wallonne Des Eaux pour analyse. Les résultats complets de ces analyses ainsi que les références des méthodes analytiques figurent en annexe 4.

Le Tableau 68 illustre les successions culturales des parcelles associées à ces six échantillons composites.

Tableau 68. Liste des parcelles en 'suivi phyto' et précédents culturels associés

N° échantillon	Parcelle	Période	Précédents culturels	
			Année	Culture/interculture
1	Sole 4	hiver 2012-2013	2012	pépinière d'arbres fruitiers
2	Sole 4	hiver 2011-2012	2011 2010 2009	pépinière d'arbres fruitiers froment haricot/avoine
3	Bovenistier	hiver 2012-2013	2012	betterave
4	Bovenistier	hiver 2011-2012	2011 2010 2009	haricot/moutarde poireau fève-épinard
5	Haute Bova	hiver 2012-2013	2012 2011 2010	pois/nyger froment/moutarde betterave
6	Chemin de Fer	hiver 2012-2013	2012 2011 2010	froment/avoine + trèfle pomme de terre/moutarde pois-haricot

10.2.1 Sole 4

Synthèse des résultats

L'eau qui a percolé à travers ce lysimètre a présenté, au cours de l'hiver 2012-2013, une concentration moyenne en pesticides de 42 ng/l. Les principales molécules identifiées sont :

- le dinoterb (11 ng/l)
- le chloridazon (6 ng/l)

Au cours de l'hiver précédent (2012-2011), la concentration moyenne en pesticides a été de 106 ng/l. Les principales molécules actives identifiées sont :

- le dinoterb (11 ng/l)
- le mecoprop (40 ng/l)
- le chloridazon (6 ng/l)
- le metamitron (16 ng/l)
- la terbuthylazine (6 ng/l)

Applications de produits phytosanitaires

Le mecoprop a été apporté sur la parcelle le 29 avril 2010 (0,36 kg/ha). Il est retrouvé au cours de l'hiver 2011-2012 mais plus l'hiver suivant (concentration inférieure à la limite de quantification).

Le chloridazon, présent en très faible concentration (6 ng/l) au cours des deux saisons de percolation a été apporté sur la parcelle en 2002 (3,5 l/ha de Pyramin, soit 1,8 kg/ha de chloridazon). Le métamitron a également été apporté en 2002 sous forme de Goltix (1,3 l/ha soit 0,9 kg/ha de matière active).

La terbuthylazine (substance active présente dans des herbicides agréés pour le maïs et utilisée en céréales dans les années '70 et '80), présente en très faible concentration (6 ng/l) n'est pas renseignée dans les applications de produits phytosanitaires réalisées à partir de 2010.

La pendiméthaline et le linuron, appliqués en mai 2012 ne sont pas détectés dans l'échantillon 2012-2013.

L'exemple du métamitron et de la terbuthylazine indique que des matières actives présentant un indice GUS élevé (Tableau 69) sont encore présentes dans les lixiviats plus de 10 ans après leur application. Pour les matières actives à risque moyen de lixiviation telles que le chloridazon et le mecoprop, le constat est moins évident puisque le chloridazon est encore présent 10 ans après son application alors que le mecoprop répandu en 2010 est présent au cours de l'hiver 2011-2012 mais absent lors de la saison de percolation suivante.

Il n'est pas possible d'évaluer l'impact de l'application d'un produit à risque faible de lixiviation tel que la pendiméthaline car celui-ci a été appliqué quelques mois avant la dernière saison de collecte d'échantillons.

La présence (à très faible concentration) de dinoterb n'est pas expliquée car cette molécule, homologuée jusqu'au début des années '90, présente une $DT50_{sol}$ assez faible (10 jours)¹³.

¹³ <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/fr/index.htm> consulté le 23 septembre 2013

Tableau 69. Indice GUS¹⁴ des matières actives présentes dans les lixiviats (source : Pesticide Properties Database <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/fr/index.htm>)

Matière active	Indice GUS	Evaluation du risque de lixiviation
Bentazone	2,30	moyen
Chloridazon	2,54	moyen
Clopyralide	5,06	élevé
Dinoterb	2,38	moyen
Dimethenamide - P	1,71	faible
Ethofumesate	3,19	élevé
Lenacile	4,25	élevé
Linuron	2,03	moyen
Mécoprop - P	2,29	moyen
Métamitron	3,05	élevé
Metribuzine	2,57	moyen
S Metolachlore	1,94	faible
Pendimethaline	-0,39	faible
Propazine	3,84	élevé
Terbuthylazine	3,07	élevé

Il convient également de mentionner la présence, au cours de l'hiver 2011-2012, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (54 ng/l) qui n'ont pas été observés dans l'échantillon 2012-2013. Cette parcelle n'ayant au cours de ces dix dernières années jamais reçu de matière organique non agricole, la source potentielle de ces molécules n'a pu être mise en évidence.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont formés par la fusion de plusieurs noyaux benzéniques. Ces composés peuvent être d'origine naturelle et sont présents dans des combustibles fossiles à des concentrations importantes. Ils se forment à des températures entre 500 et 700°C, par exemple, lors de la cokéfaction du charbon et la pyrolyse ou la mauvaise combustion des combustibles fossiles ou du bois. Les incendies de forêt constituent une source importante en milieu non urbain. Les principales sources en milieu urbain sont l'émission lors de la combustion des carburants de véhicules ou du chauffage. Ils peuvent être trouvés à des concentrations élevées dans des cendres d'incinérateurs et de certaines centrales électriques. Les HAP constituent une pollution de fond de la plupart des boues de station d'épuration, dont la concentration moyenne se situe entre 15 et 50 mg HAP/kg (Barriuso et al, 1996).

Ces molécules sont bien adsorbées par la matière organique du sol et présentent une durée de demi-vie assez importante (Figure 27).

¹⁴ Groundwater Ubiquity Score : indice de risque de lixiviation, fonction empirique de la durée de demi-vie et le coefficient d'adsorption K_{oc} : $GUS = \log(DT50) \times (4 - \log(K_{oc}))$

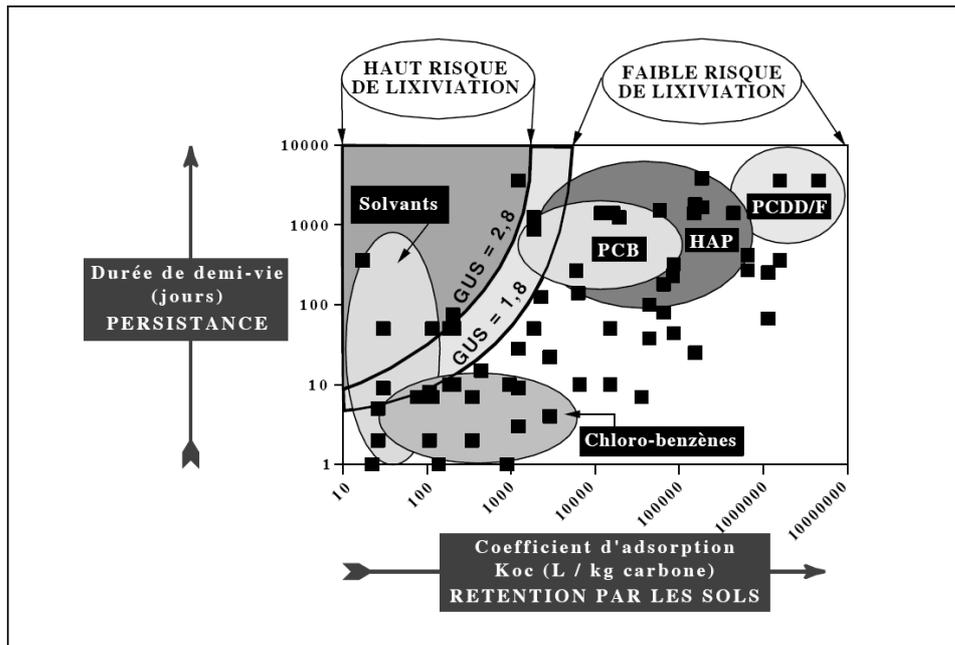


Figure 27. Diagramme de risque de lixiviation de produits phytosanitaires (indice GUS) (source : Barriuso et al, 1996)

10.2.2 Bovenistier

Synthèse des résultats

L'eau qui a percolé à travers ce lysimètre a présenté, au cours de l'hiver 2012-2013, une concentration moyenne en pesticides de 88 ng/l. Les principales molécules identifiées sont :

- la bentazone (6 ng/l)
- le dinoterb (9 ng/l)
- le mecoprop (6 ng/l)
- le 2,4,5-T (38 ng/l)

Il convient également de mentionner la présence d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (322 ng/l) essentiellement sous forme de pyrène, phénantrène et indénopyrène. Face à ce constat, un échantillon de sol a été prélevé le 19 septembre 2013 et analysé par le BEAGx¹⁵ le 20 septembre 2013 (cf. annexe 5). Les résultats des analyses indiquent la présence de pyrène (0,07 mg/kg MS) et phénantrène (0,04 mg/kg MS). La concentration en pyrène est supérieure à la valeur de référence (0,01 mg/kg MS) mais inférieure à la valeur seuil (0,9 mg/kg MS) définie par le Décret Sol¹⁶ tandis que la concentration en phénantrène est inférieure à la valeur de référence (0,1 mg/kg MS) et à la valeur seuil (6 mg/kg MS). Cette parcelle n'ayant au cours de ces dix dernières années jamais reçu de matière organique non agricole, la source de ces molécules n'a pu être mise en évidence.

Au cours de l'hiver précédent (2011-2012)¹⁷, la concentration moyenne en pesticides est de 346 ng/l. Les principales molécules identifiées sont :

- la bentazone (8 ng/l)
- le clopyralide (22 ng/l)
- le dinoterb (27 ng/l)
- le mecoprop (70 ng/l)
- le 2,4,5-T (6 ng/l)
- le chloridazon (48 ng/l)
- le métamitron (104 ng/l) (*concentration supérieure au seuil de non potabilité*)
- la terbuthylazine (32 ng/l)

Dans cet échantillon, aucune trace d'hydrocarbures aromatiques polycycliques n'a été décelée.

Applications de produits phytosanitaires

La bentazone, appliquée en juillet 2011 (0,240 kg/ha), est détectée dans les deux échantillons d'eau.

Le clopyralide et le métamitron sont appliqués en avril et mai 2012. Le métamitron est présent à une concentration cinq fois supérieure à celle du clopyralide. Les caractéristiques de ces deux produits (Tableau 70) indiquent que la dose joue un rôle prépondérant dans les niveaux de concentration observés dans les lixiviats. En effet, les DT 50 de ces deux produits sont équivalentes et le métamitron plus adsorbé par la matière organique que le clopyralide.

¹⁵ Bureau d'étude Environnement et Analyses (ULg Gembloux Agro-Bio Tech)

¹⁶ 5 décembre 2008 - Décret relatif à la gestion des sols (1) (M.B. 18.02.2009 - add. 06.03.2009 - entrée en vigueur le 18.05.2009) <http://environnement.wallonie.be/legis/solsoussol/sol003.htm>

¹⁷ La période de collecte des lixiviats s'est prolongée jusqu'en août 2012.

Tableau 70. Caractéristiques du clopyralide et du métamitron

Matière active	Dose (kg/ha)	Indice GUS	DT 50 sol (jours)	Koc
clopyralide	0,035	5,06	34	5,0 (fortement mobile)
métamitron	0,7	3,05	30	77,7 (mobilité modérée)

Il est surprenant d'observer l'absence de ces deux matières actives dans l'échantillon 2012-2013 alors que le dinoterb reste présent avec une DT50 sol de 10 jours et un indice GUS plus faible que ces deux matières actives. Ce constat tend à indiquer que le dinoterb observé dans tous les lixiviats n'est pas le résidu d'applications réalisées jusqu'au début des années '90 mais plutôt un métabolite d'une autre matière active.

Bien que présentant une DT 50 sol élevée (70 jours), un indice GUS et une dose appliquée comparable au métamitron, l'éthofumesate pulvérisé en juillet 2011 et avril 2012 (0,22 kg/ha et 0,15 kg/ha), n'est détectée dans aucun des deux échantillons. L'explication réside vraisemblablement dans une forte adsorption par la matière organique, ce qui correspond à une Koc très élevée (donnée non disponible mais cohérente avec l'indice GUS et la DT50 de l'éthofumesate).

Le mécoprop a été appliqué en avril 2008 (0,23 kg/ha). Sa présence est encore significative (70 ng/l) au cours de l'hiver 2011-2012. Par contre, l'hiver suivant, il est très peu présent (6 ng/l).

La pendimethaline, appliquée (0,4 kg/ha) en juillet 2010, n'est détectée dans aucun des deux échantillons. Ce constat est logique compte tenu de l'indice GUS très faible de cette matière active.

Le lenacile est observé dans les deux échantillons à faible concentration (10 ng/l en 2011-2012 et non quantifiable en 2012-2013). Un apport de 0,32 kg/ha a été effectué en 2009.

Le S métolachlore, appliqué (0,576 kg/ha) en juin 2011, est détecté mais non quantifiable en 2011-2012 et 2012-2013. Ce constat est concordant avec le risque faible à moyen de lixiviation attribué à cette matière active (indice GUS de 1,94).

A titre d'exemple, un bilan massique (Tableau 71) du métamitron indique que 0,007% de cette substance a percolé sous la zone racinaire au cours de l'hiver 2011-2012.

Tableau 71. Bilan massique du métamitron sur la parcelle Bovenistier

<p>Apports du 27 avril au 19 mai 2012 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 l/ha de Kombo soit l'équivalent de 1.4 kg/ha de métamitron <p>Lixiviation au cours de l'hiver 2011-2012 (de janvier à août 2012) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume d'eau : 91,5 l - concentration : 104 ng/l - superficie du lysimètre : 1 m² - ➔ flux de métamitron : 0,095 g/ha
--

10.2.3 Haute Bova

Synthèse des résultats

L'eau qui a percolé à travers ce lysimètre a présenté, au cours de l'hiver 2012-2013, une concentration moyenne en pesticides de 66 ng/l. Les principales molécules identifiées sont :

- le dinoterb (37 ng/l)
- le chloridazon (12 ng/l)

Applications de produits phytosanitaires

Une application de chloridazon (0,5 l/ha de Pyramin, soit 0,26 kg/ha de chloridazon) a été réalisée en avril 2010.

Une application de bentazone (0,432 kg/ha) a été réalisée le 26 juin 2012. Cette molécule n'est pas présente dans les échantillons d'eau récoltés au cours de l'hiver 2012-2013.

La pendiméthaline appliquée en mai 2012 (0,4 kg/ha) n'est pas retrouvée au cours de l'hiver 2012-2013. Vu son indice GUS très faible, ce constat est logique.

10.2.4 Chemin de fer

Synthèse des résultats

L'eau qui a percolé à travers ce lysimètre a présenté, au cours de l'hiver 2012-2013, une concentration moyenne en pesticides de 52 ng/l. Les principales molécules identifiées sont :

- la bentazone (6 ng/l)
- le dinoterb (13 ng/l)
- le mecoprop (10 ng/l)

Applications de produits phytosanitaires

Une application de bentazone (0,9 kg/ha) a été réalisée au printemps 2010.

La metribuzine appliquée en mai 2011 (0,25 kg/ha) n'est pas retrouvée dans l'échantillon d'eau bien que son indice GUS soit moyen.

10.3 Conclusions et recommandations

Au cours des hivers 2011-2012 et 2012-2013, six échantillons d'eau représentatifs de lixiviats en sol limoneux cultivé ont été analysés pour doser une centaine de matières actives.

Ces résultats ont été analysés et interprétés à la lumière des applications (pulvérisations) réalisées par les trois agriculteurs concernés.

Plusieurs constats peuvent être faits :

- de manière générale (5 échantillons sur 6), la concentration globale en produits phytosanitaires est 5 à 10 fois inférieure au seuil de non-potabilité,
- l'échantillon « non potable » est le fait d'une seule molécule présentant un risque de lixiviation élevé et apportée à une dose « élevée » (1,4 kg/ha) mais conforme aux prescriptions,
- les indices GUS sont globalement cohérents,

- à indice GUS comparable, il y a une relation logique entre la dose apportée et la concentration dans les lixiviats,
- le dinoterb, matière active inutilisée depuis une vingtaine d'années, est présent dans tous les lixiviats. Soit elle est persistante (en contradiction avec une DT50 de 10 jours), soit il s'agit d'un métabolite d'autres molécules autorisées. Les concentrations observées sont néanmoins cohérentes avec l'Etat des nappes d'eau souterraine publié par le SPW¹⁸ qui indique une concentration inférieure à 25 ng/l dans la majorité des situations,
- la présence d'HAP dans certains échantillons reste inexplicée.

Il convient de lire ces constats avec les précautions d'usage, ils ne sont établis 'que' sur six échantillons d'eau représentatifs tant sur le plan hydrologique (saisons de percolation complètes) qu'agronomique (sol limoneux, polyculture). Par ailleurs, les analyses réalisées par la SWDE n'ont ciblé que les matières actives qui doivent être suivies réglementairement.

Néanmoins, ces résultats permettent, pour la première fois en région wallonne, d'évaluer les pertes de ces produits du seul fait de leur pulvérisation sur des parcelles cultivées ; les autres sources potentielles agricoles (vidange et rinçage de cuve) et non agricoles ne pouvant affecter les résultats de ces analyses. Cette échelle de travail (parcelle) contribue efficacement à la compréhension des processus de transfert étudiés sur des territoires plus importants tels que des bassins versants (par exemple, le bassin de la Dyle analysé par Beernaerts et al, 1999) ou des masses d'eau.

Vu la quantité d'informations déjà acquise (relevé pluriannuel des applications, six résultats d'analyse), il conviendrait de poursuivre ce monitoring dans le but :

- de pouvoir évaluer les flux de produits phytosanitaires vers les eaux souterraines,
- d'anticiper une éventuelle contamination pour un produit particulier et d'objectiver une future réglementation sur l'usage des produits phytosanitaires en agriculture.

¹⁸ <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/#3.3> (consulté le 23 septembre 2013)

11 Conclusions

Ce rapport synthétise les résultats d'essais, les mesures et les observations qui ont été réalisées sur et en dehors des parcelles lysimétriques depuis le début de cette étude (réf. 3523/4 – période du 1^{er} octobre 2010 au 30 juin 2013).

11.1 Conclusions des essais

Les essais mis en place chaque année sur et en dehors des parcelles lysimétriques ont permis de tester l'impact soit d'une réduction de la fertilisation azotée soit des modes de gestion de l'interculture sur les rendements des cultures (légumières principalement), les reliquats azotés dans le sol et la qualité de l'eau de percolation (dans les parcelles équipées d'un lysimètre).

Depuis 2010, dix **essais de réduction de la fertilisation azotée** ont été mis en place, ceux-ci se répartissant selon les cultures suivantes :

- fève des marais : depuis 2010 et suivant les recommandations de la convention précédente, les besoins forfaitaires de la fève des marais sont fixés à 70 kg N/ha. Trois essais ont été menés lors de ce volet de l'étude visant à tester jusqu'où les conseils de fumure pouvaient être réduits sans avoir d'incidence négative sur le rendement et/ou la qualité de la récolte en fève des marais. Dans les trois essais mis en place, la réduction du conseil de fertilisation (jusqu'à -50 kg N/ha) s'est justifiée, en ce sens que l'on n'a pas observé de réduction significative du rendement en fève et que les reliquats azotés post-récolte n'étaient pas significativement différents. Il faut cependant rester prudent car, bien que non significatives, les différences de rendement étaient en faveur de l'objet 'fumure conseil' dans les deux essais où la réduction de fertilisation était la plus importante.
- carotte : depuis 2010 et suivant les recommandations de la convention précédente, les besoins forfaitaires de la carotte sont fixés à 110 kg N/ha. Deux essais ont été menés lors de ce volet de l'étude visant à tester jusqu'où les conseils de fumure pouvaient être réduits sans avoir d'incidence négative sur le rendement et/ou la qualité de la récolte en carotte. Sur un des deux essais, la réduction du conseil (-45 kg N/ha) était à proscrire car entraînant une réduction significative du rendement sans différence significative de reliquat azoté post-récolte. Par ailleurs, cet essai a également montré que l'apport de l'engrais azoté en cours de culture était moins efficace que celui au semis. Cet apport était probablement tardif. Il est délicat de tirer des conclusions sur l'autre essai en raison des difficultés de germination des plantules engendrées par la fonte de l'engrais.
- betterave : deux essais menés en 2010 ont testé une réduction de 61 kg N/ha et de 78 kg N/ha de la fertilisation azotée. Dans les deux essais, la réduction de la fertilisation azotée s'est justifiée, n'entraînant pas de réduction significative de rendement ni de différence significative de reliquat azoté post-récolte.
- haricot : un essai mené en 2011 a testé une réduction de 37 kg N/ha de la fertilisation azotée. Contrairement à ce qui avait été observé dans les essais menés précédemment, cette réduction n'a pas induit de baisse de rendement. Par contre, elle a engendré une réduction significative du reliquat azoté post-récolte. Suite à un accident cultural, le haricot n'a toutefois pas pu exprimer son potentiel de rendement.

- épinard d'automne : un essai mené en 2010 a testé une réduction de 40 kg N/ha de la fertilisation azotée. Celle-ci s'est justifiée, en ce sens qu'elle n'a pas entraîné de réduction significative de rendement ni de différence significative de reliquat azoté post-récolte.
- poireau : un essai mené en 2011 a montré que l'apport d'une fraction de 50 kg N/ha un mois avant la récolte était inutile, en ce sens qu'elle n'a pas conduit à un gain de rendement ni de qualité de récolte ; de plus, une partie de cette fraction se retrouvait dans le sol à la récolte.

Par ailleurs, sept **essais de gestion de l'interculture** après des cultures de froment, de pois, de haricot et de pomme de terre ont été mis en place depuis 2010. Les enseignements suivants peuvent être tirés de ces essais :

- trois essais ont montré que le semis de couverts composés d'une légumineuse pure ou en mélange avec une graminée est une mesure efficace pour réduire l'APL après une culture de froment. La date de semis de ces couverts a toute son importance : les couverts semés plus tardivement (mi-septembre) ont été moins efficaces pour réduire l'APL que les couverts semés plus précocement (fin août). Ces essais n'ont pas mis en évidence de différence significative d'APL entre un couvert de légumineuse pure (trèfle d'Alexandrie) et un couvert de légumineuse en mélange avec une graminée (trèfle d'Alexandrie – Avoine brésilienne). Par contre une différence significative (même si faible en valeur absolue) d'APL a été mise en évidence entre un couvert de légumineuse en mélange avec une graminée (Vesce – Avoine brésilienne) et une graminée pure (Avoine brésilienne).
- deux essais ont testé l'impact du semis d'un nyger en interculture courte entre la récolte d'un pois et le semis d'un froment. Dans les deux cas, le nyger a montré son efficacité pour réduire l'APL par rapport à l'absence de couverture de sol entre le pois et le froment, situation dans laquelle la minéralisation des résidus de culture de pois peut engendrer des reliquats azotés élevés qui ne seront que partiellement récupérables par le froment. La date de semis du nyger est cependant prépondérante : l'efficacité de prélèvement du nyger est accrue en cas de semis plus précoce (fin juillet – début août). Pour un semis plus tardif (fin août), il est préférable de se tourner vers une moutarde. Ces essais n'ont pas mis en évidence d'impact du nyger sur le froment qui a suivi, si ce n'est l'impact positif sur l'indice de Zéleny dans un essai.
- un essai a montré l'impact positif sur l'APL du semis d'une moutarde en interculture longue après la récolte d'un haricot. Par rapport au sol nu, la moutarde a prélevé plus de 40 kg N-NO₃⁻/ha. La problématique de la gestion de l'interculture reste cependant entière après un haricot récolté tardivement (après le 10 septembre), dans des conditions où la bonne implantation des CIPAN n'est plus assurée.
- un essai a montré l'impact positif sur l'APL du semis d'une moutarde en interculture courte entre la récolte d'une pomme de terre (récoltée début septembre) et le semis d'un froment. Dans des conditions favorables à son développement, la moutarde a prélevé plus de 70 kg N- NO₃⁻/ha en un mois. La moutarde n'a pas eu d'impact sur le rendement et la qualité de récolte du froment qui a suivi.

11.2 Conclusion des bilans financiers

Les essais ont également été analysés d'un point de vue financier. Les bilans financiers des essais de réduction du conseil de fertilisation tiennent compte du chiffre d'affaire de la culture et du coût de la fertilisation azotée, qui est fort variable d'une année à l'autre. Il est donc difficile de comparer les résultats obtenus d'une année à l'autre.

Globalement, les bilans financiers établis dans les essais de réduction du conseil de fertilisation ne permettent pas de dégager de tendance générale : si dans certains essais, le gain engendré par la réduction du conseil permet de compenser l'éventuelle diminution de rendement, ce n'était pas le cas dans d'autres essais. C'est ainsi que sur les dix essais de réduction de la fertilisation mis en place depuis 2010, cinq se sont révélés plus rentables avec l'application du conseil et cinq se sont révélés plus rentables avec la réduction du conseil. A titre illustratif, les cultures de carotte et de betterave ont fait l'objet chacune de deux essais depuis 2010 ; pour ces deux cultures, un essai s'est révélé plus rentable en réduisant le conseil de fertilisation alors que l'autre essai s'est révélé plus rentable en appliquant le conseil.

Concernant les essais de gestion de l'interculture, il a été possible d'estimer les coûts d'implantation des CIPAN (entre 70€/ha et 135 €/ha) et de les mettre en balance avec le bénéfice environnemental attendu. Il existe par ailleurs une série de bénéfices liés à l'implantation d'une CIPAN qui sont difficilement chiffrables (protection des terres contre l'érosion, amélioration de la structure du sol, production de fourrage,...). L'impact financier de l'implantation des CIPAN sur le froment qui a suivi a également été évalué, bien qu'il n'y ait pas eu de différence de gestion de la fumure azotée en froment alors que les profils azotés en sortie d'hiver affichaient des différences.

11.3 Conclusions de l'observation de la qualité de l'eau

Les lysimètres mis en place depuis dix ans ont à nouveau montré leur efficacité pour assurer un suivi quantitatif et qualitatif de la lixiviation du nitrate en relation avec les pratiques culturales. L'observation de la qualité de l'eau dans les lysimètres au cours des trois années de ce projet a permis de confirmer les tendances déjà observées depuis le début de l'étude :

- les rotations classiques betterave – céréale – CIPAN (correctement gérées au niveau de la fertilisation azotée) ont permis d'obtenir des eaux de percolation faiblement chargées en nitrate. L'impact sur la qualité de l'eau de l'introduction d'un mélange légumineuse – céréale en tant que CIPAN est encore incertain ; une augmentation difficilement explicable des teneurs en nitrate a en effet été observée dans un des lysimètres après l'implantation d'un mélange légumineuse – céréale.
- l'introduction d'une (double) culture légumière (avec légumineuse) dans la rotation classique a entraîné une augmentation parfois importante des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation ; cette augmentation peut être atténuée par l'implantation d'une CIPAN après la culture légumière.
- les parcelles emblavées de cultures à risque au niveau des APL (pois, haricot, poireau, pomme de terre,...) plusieurs années de suite ont vu une augmentation durable des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation. L'introduction d'une CIPAN (pour autant

que celle-ci soit implantée dans des conditions permettant son bon développement) après une culture principale laissant des APL élevés a permis de limiter l'APL par rapport à une situation de sol nu et d'atténuer la dégradation de la qualité de l'eau de percolation (en termes de nitrate), sans pour autant que celle-ci ne s'améliore significativement. Pour ce type de cultures "à risques" au niveau des APL, si l'on veut réduire sensiblement les pertes de nitrate vers les eaux souterraines, il est donc au minimum nécessaire d'adapter les modes de gestion de l'interculture, voire de modifier les successions culturales.

- 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 à l'aplomb du lysimètre a cependant permis 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, douze mois plus tard, de la qualité de l'eau de percolation.
- l'apport régulier (tous les deux ans) de matière organique (compost, fumier) dans les limites prévues par le PGDA n'a pas engendré d'augmentation des teneurs en nitrate dans l'eau de percolation. Les successions et rotations culturales ont par contre un impact plus prononcé sur la qualité de l'eau de percolation.

Au cours des hivers 2011-2012 et 2012-2013, six échantillons d'eau composites représentatifs ont été analysés par le laboratoire de la Société Wallonne des Eaux pour doser une centaine de produits phytosanitaires.

Les résultats de ces analyses ont indiqué que pour cinq de ces échantillons, l'eau était potable (moins de 100 ng/l par matière active et moins de 500 ng/l pour le total des matières actives) ; le sixième échantillon présentant une concentration de 104 ng/l pour une matière active.

Les herbicides sont la famille de produits phytosanitaires la plus présente dans les lixiviats. Leur concentration est dépendante des caractéristiques (affinité à la matière organique, dégradabilité) du produit et de la dose appliquée.

12 Références bibliographiques

1. **Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G.** (1996). Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformation et dissipation. Forum « Le sol, un patrimoine menacé ? » Paris, 24 octobre 1996. *Etude et Gestion des Sols*, 3,3 1996. pp 279-296.
2. **Beernaerts S., Gérard M., Pussemier L., Debongnie P., Copin A., Barthélemy J-P.** (1999). Prévion de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires en Belgique et remédiation par traitement sur charbons actifs. Convention D1/2-5809 A. Rapport final. Centre d'Etude et de Recherches Vétérinaires et Agrochimiques & Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. 154 p.
3. **Cellule Etat de l'Environnement Wallon** (2007). Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007. Namur : MRW - DGRNE. 736 pp.
4. **Dautrebande S., Dewez A., Hallet V., Guiot J., Rouxhet F., Monjoie A.** (1996). Programme-Action Hesbaye, Final Report of the EC-Life Project. 167p.
5. **Deneufbourg M., Vandenberghe C., Fonder N., Heens B., Xanthoulis D., Marcoen J.M.** (2010). 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. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech. 92p. + annexes.
6. **Deneufbourg M., Vandenberghe C., Fonder N., Heens B., Xanthoulis D., Marcoen J.M.** (2011). 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, mai 2011. Convention Service Public de Wallonie n° 3523/4. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech. 83p.
7. **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. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech. 97p.
8. **De Toffoli M., Imbrecht O., Descamps C.** (2010). Cultures intermédiaires piège à nitrate: Intérêt fourrager des graminées et légumineuses et comparaison de techniques de semis de la moutarde blanche – Résultats des expérimentations 2010. Dossier UCL 10-47, 40p. *In* Marcoen J.M., Lambert R., Vandenberghe C., De Toffoli M., Deneufbourg M., Benoit J., Bachelart F., 2011. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2010 des membres scientifiques de la structure d'encadrement Nitrawal*. Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech et Université catholique de Louvain, 54p. + annexes
9. **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.
10. **Fonder N., Debauche O., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J.M.** (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 1er mars 2005 au 31 mai 2007. Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Belgique. 88 p.
11. **Fonder N., Deneufbourg M., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J.M.** (2010a). Suivi de la percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **14** (S1), 17-25, <http://popups.ulg.ac.be/Base/document.php?id=4827>
 12. **Fonder N., Heens B., Xanthoulis D.** (2010b). Optimisation de la fertilisation azotée de cultures industrielles légumières sous irrigation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **14** (S1), 103-111, <http://popups.ulg.ac.be/Base/document.php?id=4958>
 13. **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.
 14. **Hérivaux C., Rinaudo J.D., Nicolai S., Biscuit A.** (2005). Développement d'un cadre méthodologique pour évaluer le coût d'atteinte du bon état des masses d'eau du bassin Rhin-Meuse. Volume I : Typologie et coût de référence des mesures. Rapport final BRGM/RP-54003-FR., BRGM: 140 p.
 15. **Nitrawal** (2007). Eau-nitrate, informations et conseils techniques pour la gestion durable de l'azote (2^{ème} édition). 162p.
 16. **Renard S., Goffart J.-P., Frankinet M.** (2007). Optimisation de l'efficacité de l'azote dans des rotations intégrant les cultures de légumes industriels en Hesbaye. Les Dossiers de la Recherche agricole. Ministère de la Région wallonne – Direction générale de l'Agriculture.
 17. **Thornthwaite C.W.** (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* **38**, 55-94
 18. **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, <http://www.pressesagro.be/base/text/v14ns1/7.pdf>
 19. **Vandenberghe C., De Toffoli M., Bachelart F., Imbrecht O., Marcoen J.M.** (2012). Survey Surfaces Agricoles. Etablissement des APL de référence 2011. Dossier GREneRA-UCL 12-02. 25p. In De Toffoli M., Vandenberghe C., Imbrecht O., Bachelart F., Deneufbourg M., Lambert O., Marcoen J.M., 2012. Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2012 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal. Université catholique de Louvain et Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, 63p. + annexes

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude aux agriculteurs chez qui se déroule le projet et sans qui celui-ci ne pourrait se mener ainsi que le SPW - DGO3 pour le soutien financier.